



SAMSUN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DİŞ HEKİMLİĞİ ÖZELİNDE FOTOPOLİMERİZASYON TEMELLİ
STEREOLİTOGRAFIK EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN GEÇİCİ DİŞ
REÇİNELERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Serkan SALMAZ

220705017

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağın BOLAT

Ocak 2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BELGESİ

07.01.2025

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmamın Samsun Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal programı” ile tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Serkan SALMAZ

ÖNSÖZ

“Diş Hekimliği Özelinde Fotopolimerizasyon Temelli Stereolitografik Eklemeli İmalat ile Üretilen Geçici Diş Reçinelerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışmasında, diş hekimliğinde dental reçine kullanılarak stereolitografik eklemeli imalat ile üretilen değişken parametrelili numunelerin, aşamalı bir şekilde deneysel metodolojiler kullanılarak aşınma davranışları incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitim hayatımın ders aşaması da dahil olmak üzere, bilimsel açıdan bana daima yardımcı ve destek olan, bilimsel araştırma sistematığını aşılayıp ilham veren ve tüm süreç boyunca manevi desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Çağın BOLAT’ a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Son olarak, aldığım tüm kararlarda bana destek olan, bana olan desteklerini esirgemeyen ve cesaretlendiren aileme teşekkür ederim.

Ocak 2025

Serkan SALMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	XI
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

1. TEKNİK LİTERATÜRE BAKIŞ	3
1.1. Eklemeli İmalat ve Kullanım Alanları	3
1.2. Fotopolimerizasyon Yöntemi.....	8
1.2.1. Fotopolimerizasyon Esaslı 3B Baskı Teknikleri	11
1.2.1.1 Stereolitografi (SLA)	11
1.2.1.2. Dijital Işık İşleme (DLP)	13
1.2.1.3. Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP)	14
1.3. Diş Hekimliği Uygulamalarına Yönelik Reçine Çeşitleri.....	15
1.3.1 Dental İmplantlar.....	17
1.3.2 Ortodonti ve Dijital Ortodonti.....	19
1.3.3 Cerrahi Kılavuzlar ve Modeller.....	21
1.4. Eklemeli İmalat ile Üretilen Komponentlerde Fiziksel Özellikler	22
1.5. Eklemeli İmalat ile Üretilen Komponentlerde Mekanik Davranışlar	24
1.6. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri	25

İKİNCİ BÖLÜM

2. MATERYAL VE YÖNTEM	28
2.1 Dental Reçine Malzemesi	28
2.2 Fotopolimerizasyon Esaslı 3B Baskı Çalışmaları	29
2.3 Uygulamalı Test Prosedürleri	33

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	36
3.1 Görsel İncelemeler ve Boyutsal Analizler	36
3.2 Yüzey Pürüzlülük Değerlendirmeleri	39
3.3 Sertlik Sonuçları.....	41
3.4 Sürtünme ve Aşınma Analizleri	43
3.5 Mikro Ölçekli Hasar Analizleri.....	46

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
4.1. Sonuçlar	54
4.2. Öneriler	55
KAYNAKÇA.....	57
ÖZGEÇMİŞ	66



ÖZET

DİŞ HEKİMLİĞİ ÖZELİNDE FOTOPOLİMERİZASYON TEMELLİ STEREOLİTOGRAFIK EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN GEÇİCİ DİŞ REÇİNELERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Serkan SALMAZ

220705017

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Samsun Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Aralık 2024

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağın BOLAT

Eklemeli imalat (Eİ), otomotiv, havacılık, tıp ve diş hekimliği gibi birçok farklı sektöre uygulanabilen çok yönlü bir teknolojidir. Hızlı prototipleme, ucuz proses ve karmaşık şekillerin üretilme yeteneği açısından büyük bir potansiyele sahiptir, katman katman baskı yöntemi gelecekteki endüstriyel üretim yöntemleri için umut verici alternatiflerden biridir. Bu bağlamda, bu tez çalışması önceki çalışmalardan farklı olarak, fotopolimerizasyon tabanlı Eİ teknolojisiyle üretilen özel diş numunelerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini hem baskı parametreleri hem de kuru kayma testi değişkenlerine göre açıklamayı amaçlamaktadır. Ayrıca bu tez çalışması, değişken pozlama süresinin, yapı yönünün ve kayma kuvvetinin, basılı numunelerin yüzey pürüzlülüğü, sertliği, sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve hasar mekanizmaları üzerindeki birleşik etkilerini incelemek için yapılan ilk çalışmadır. Sonuçlar, 8 saniyelik pozlama süresiyle dikey üretilen numuneler için maksimum ortalama sertlik değerinin 89.8 Shore D olduğunu göstermiştir. Ek olarak, dikey basılan numuneler yatay numunelere göre daha iyi aşınma direnci gösterdiği ve artan pozlama süresi genellikle numunelerin sertlik seviyelerini olumlu yönde etkilemiştir. En az hacim kaybı 78 mm^3 ile 5 N kuvvet altındaki dikey numunede olmuştur. Test kuvvetinin artması sürtünme katsayısı sonuçlarında azalmaya neden olmuştur ve numunelerde hacim kaybı artışı tetiklemiştir. Tüm numuneler arasında, hesaplanan sürtünme katsayısı değerleri 0,3 ile 0,87 arasında değişmiştir. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) analizleri, artan polimerizasyon sürelerinin, nihai hacim kaybı sonuçlarını belirleyen değişen temas yüzeyi karşılaştırmalarının yapıldığını göstermiştir. Ayrıca, deformasyonun doğasının anlaşılması ve hasar mekanizmasının tespiti için mikro ölçekli tetkiklerde yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında elde edilen deneysel verilerle,

bulguların El ve diř hekimliği alanlarında gelecekteki çalışmalara geniş bir bakış açısı getirebileceği ve pratik uygulamalarda hasta sağlığına olumlu katkı sunabileceği dūřünölmektedir.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli imalat, Dental reçine, Sürtünme katsayısı, Fotopolimerizasyon, Aşınma direnci



ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOR OF TEMPORARY DENTAL RESINS PRODUCED BY PHOTOPOLYMERIZATION-BASED STEREOLITHOGRAPHIC ADDITIVE MANUFACTURING FOR DENTISTRY SPECIFIC

Serkan SALMAZ

220705017

Mechanical Engineering Graduate Program

Samsun University Graduate School, December 2024

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Çağın BOLAT

Additive manufacturing (AM) of polymers is a highly versatile technology that can be applied to many independent sectors like automotive, aviation, medicine, and dentistry. Since it has great potential for rapid prototyping, clean process concepts, and the ability to produce complex shapes, the layer-by-layer printing method is one of the most promising alternatives for future industrial production efforts. In that sense, different from the previous studies, this work aims to elucidate the friction and wear properties of the special dental samples manufactured via photopolymerization-based AM technology according to both for printing parameters, and dry sliding test variables. Also, this is the first initiation to examine the combined influences of the UV exposure time, building direction, and sliding force on the surface roughness, hardness, friction coefficient, wear rate, and main plastic damage mechanism of the printed samples. The results showed that the maximum average hardness value was detected as 89.8 Shore D for vertically built samples printed with 8 s exposure time. In addition, vertically printed samples exhibited better wear resistance than the horizontal samples and the rising exposure time generally affected affirmatively the hardness levels of the samples. The lowest volume loss of 78 mm³ belonged to the vertical sample at 5 N. Further, increasing test force levels caused a decrease in the friction coefficient results and triggered the volume loss increase in the samples. Among all samples, the calculated friction coefficient values changed between 0.3 and 0.87. On the other side, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS) analyses pointed out that ascending exposure times led to the altering contact surface matchings determining the final volume loss outcomes. In addition, micro-scale examinations were conducted to understand the nature of the deformation and to determine the damage mechanism. In the

light of this information, it is thought that the findings can provide a broad perspective to future studies in the fields of EI and dentistry and contribute positively to patient health in practical applications.

Keywords: Additive manufacturing, Dental resin, Friction coefficient, Photopolymerization, Wear resistance



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Kullanılan diş reçinesinin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 2. SLA işlem parametreleri.....	30
Tablo 3. SLA ile üretilen numunelerin fiziksel özellikleri	37
Tablo 4. Test sonuçlarının hasar özetleri	53



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 3B baskı (eklemeli imalat) prosesinin adımları	3
Şekil 2. Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması	5
Şekil 3. 3B Eklemeli imalat uygulamalarında önde gelen sektörler	6
Şekil 4. Dental sektöründe 3B imalatın tahmini pazar payı	7
Şekil 5. 2023 yılı dental sektörde, 3B imalatın kullanım alanlarına göre pazar payları	8
Şekil 6. Epoksi malzemesi ve fotopolimerizasyon reaksiyon süreci	9
Şekil 7. Diş hekimliğinde 3B baskı ile üretilmiş gerçek uygulamalar	11
Şekil 8. SLA' nın çalışma prensibi.....	12
Şekil 9. DLP yönteminin proses şeması.....	13
Şekil 10. CDLP yönteminin proses şeması	14
Şekil 11. Diş hekimliği, biyomedikal ve tıp odaklı reçine türleri	16
Şekil 12. Diş implantından beklentiler	17
Şekil 13. SLM yoluyla üretilen titanyum implantlar; düz (sol) ve vidalı (sağ)	18
Şekil 14. CoCrMo ve Ti64 alaşımının dental alandaki uygulaması	19
Şekil 15. Çene-yüz operasyonları için örnek bir BT tarama görüntüsü	20
Şekil 16. Farklı boyut aralığına sahip cerrahi kılavuzlar.	21
Şekil 17. Diş hekimliğinde model ve cerrahi kılavuz üretimi için 3B baskı aşamaları	22
Şekil 18. Frezeleme (a) ve 3B baskı (b) arasındaki hassasiyet farkı.....	23
Şekil 19. Protezlere yönelik zirkonya baskısı. SLA baskılı numuneler (a), kusurların bilgisayarlı tomografi görüntüleri (b), kusurları olmayan numunelerin ultrasonik sonuçları (c) ve (d)	24
Şekil 20. Kullanılan reçine, Alias Dental Temp C&B	28
Şekil 21. Test numune tasarımı	29
Şekil 22. Kullanılan 3B yazıcı.....	30
Şekil 23. Diş numuneleri için üretim akış şeması	31
Şekil 24. Basılan numunelerin platformundan ayrılması	31

Şekil 25. Test numunelerinin solisyon ile temizlenme süreci	32
Şekil 26. Test numunelerinin kürlenme süreci	32
Şekil 27. Test numunesi boyut ölçümü	33
Şekil 28. Test numuneleri ağırlık ölçümü	34
Şekil 29. Aşındırma testi kurulumunun şematik görünümü (a), ve cihazın gerçek genel görünüm (b) aşındırıcı alanının görünümü (c)	35
Şekil 30. Makro değerlendirmeler (a) ve basılan numunelerin son işleme bağlı olarak öncesi/sonrası görüntüleri (b)	36
Şekil 31. Dikey ve yatay olarak oluşturulan numunelerin çap (a) ve boy (b) cinsinden boyutsal doğruluk sonuçları.....	38
Şekil 32. Yüzey pürüzlülüğü stratejisinin (a) ve üretim yönüne bağlı olarak ölçülen yüzeyler (b) şematik görüntüleri (c).....	40
Şekil 33. SLA baskılı numunelerin pozlama süresine ve üretim yönüne bağlı olarak sertlik sonuçları	41
Şekil 34. Değişken test yüklerine ve üretim yönüne bağlı olarak SLA baskılı numunelerin sürtünme katsayı sonuçları; 5N (a), 10N (b) ve 15N (c)	44
Şekil 35. Test yüklerini değiştirmek için maruz kalma süresine ve üretim yönüne bağlı olarak SLA baskılı numunelerin hacim kaybı sonuçları; 5N (a), 10N (b) ve 15N (c)	45
Şekil 36. Artan test kuvvetinin sabit maruz kalma süresi ve üretim yönüne etkisi; 5 N (a), 10 N (b) ve 15 N (c).....	47
Şekil 37. Pozlama süresine bağlı olarak en şiddetli durumdaki 15 N' deki dikey baskılı numuneler için aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri; 4s (a), 6s (b), 8s (c) ve 10s (d).....	49
Şekil 38. Pozlama süresine bağlı olarak en şiddetli durumdaki 15 N' deki yatay baskılı numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri; 4s (a), 6s (b), 8s (c) ve 10s (d)	51
Şekil 39. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji dağıtımlı spektroskopi (EDS) analizleri ile en az aşınmış (A), en çok aşınmış (B) örnekler.....	52
Şekil 40. En düşük ve en yüksek aşınma dirençli numunelerin yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması.....	52
Şekil 41. Tez Çalışması Sonucu Sunulan Öneriler	55

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: Amerika Malzeme ve Test Merkezi
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	: Bilgisayar Destekli İmalat
CDLP	: Sürekli Dijital Işık İşleme
CNC	: Bilgisayar Destekli Numerik Kontrol
CoF	: Sürtünme Katsayısı
CoCrMo	: Kobalt Krom Molibden Alaşımı
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
DLP	: Dijital Işık İşleme
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
Eİ	: Eklemeli İmalat
FDM	: Kaynaşık Biriktirme Modelleme
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
N	: Newton
SLA	: Stereolitografi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum Karbon
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
Ti6Al6V	: Titanyum Grade 23 Alaşımı
UV	: Morötesi Işık
PJ	: Malzeme Püskürtme
PMMA	: Polimetil Metakrilat
3B	: Üç boyutlu
°C	: Santigrat Derece
ρ	: Yoğunluk
μm	: Mikrometre
s	: Saniye
g	: Gram

GİRİŞ

Son yıllarda küresel ısınma ve hava kirliliği gibi sorunların dünya üzerinde etkilerini göstermesi nedeniyle enerji verimliliği, yakıt tüketiminin optimizasyonu, yenilenebilir alternatif enerji kaynakları ve temiz üretim konusundaki genel kaygılar artmıştır. Tam da bu noktada alternatif imalat yöntemlerinin önemi ortaya çıkmıştır. Döküm, kaynak, talaşlı imalat, dövme gibi geleneksel yöntemlerin imalat sektörlerindeki toplam payı azalarak yerini yeni imalat sektörlerine bırakması kaçınılmaz olmuştur. Son dönemde pek çok hükümetin uygulamaya koyduğu kararlı politikalar, düşük karbon ayak izi ihtiyacı nedeniyle üreticileri ve yatırımcıları, temiz ve çevre dostu sistemlere yönelmeye teşvik etmiştir. Ayrıca mevcut üretim hatları ve atık yönetimi stratejileri, firma ve tesislerin tehlikeli gaz emisyonlarını azaltacak şekilde yeniden yapılandırılması sağlanmaktadır. Bu gelişmeler ışığında sektörel araştırma geliştirme uygulamalarının yanı sıra, konvansiyonel olmayan ve temiz üretim yöntemlerine yönelik araştırmaların da önümüzdeki yıllarda artacağı öngörülmektedir.

Yapılan son çalışmalara yönelik iş birliğinin artması ve tecrübelerin birleştirilmesi ile çıktı veriminin arttığı görülmüştür. Makine, malzeme, biyomedikal mühendisliği ve diş hekimliği alanları arasındaki disiplinler arası çalışmalar, özellikle mekanik ortodonti analizleri ve hastaya özel üç boyutlu (3B) baskı uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Bu anlamda fotopolimerizasyon tabanlı 3B baskı, diş hekimleri ve mühendisler için kaliteli modeller, cerrahi kılavuzlar, pratik protezler ve yüksek performanslı geçici dişler yapmak için oldukça faydalı bir yöntemdir. Gerçek hizmet koşullarında, korozyona dayanıklılık, mekanik mukavemet ve aşınma direnci, herhangi bir sağlık riski olmaksızın yapay bir diş protezinin karşılaması gereken en önemli özelliklerdir. Mekanik özellikler diş hekimliği için önemli bir konudur ve modellerde, protezlerde ve geçici dişlerde kullanılan diş polimerleri genellikle stereolitografi (SLA) ve doğrudan ışıkla işleme (DLP) gibi vat-polimerizasyon yöntemleriyle üretilir. Eklemeli imalat (Eİ) yoluyla üretilen fotopolimerize diş reçinelerinin aşınma ve sürtünme özellikleri gerçek ortodonti ve implant uygulamalarında oldukça kritik olmasına rağmen, bu alandaki araştırmaların sayısı mekanik çalışmalara göre nispeten daha azdır.

Önceki bilimsel çalışmalar ve teknik çalışmalar araştırıldığında, özel diş reçinelerinin aşınma mekanizmasını anlamak için daha detaylı çalışmalar yapılması gerektiği görülmüştür. Ayrıca, 3B baskı proses parametreleri ile kullanılan polimer reçinelerin kimyasal konfigürasyonu arasındaki güçlü ilişkinin titiz deneysel çalışmalarla aydınlatılması

gerektiği açıktır. Bu tez çalışmasında, özel bir geçici diş reçinesinin aşınma direnci açısından SLA yazdırma değişkenleri (pozlama süresi ve üretim yönü) ile sürtünme testi değişken basınç kuvveti arasındaki birleşik etkileşimi teknik literatürde ilk kez ele alınmıştır. Buna paralel olarak hacim kaybı, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik sonuçlarıyla birlikte detaylı bir şekilde analiz edilētir. Ayrıca aşınmış numunelerin temel deformasyon mekanizmasını bulmak için mikro ölçekli incelemeler yapılmıştır ve hasar modları detaylı bir şekilde spektrometrik karakterizasyon yöntemleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel verilerle bulguların, eklemeli imalat ve diş hekimliği alanlarında gelecekte yapılacak çalışmalara geniş bir bakış açısı kazandırılması ve ilgili sektörlere yeni bir perspektif aması beklenmektedir.

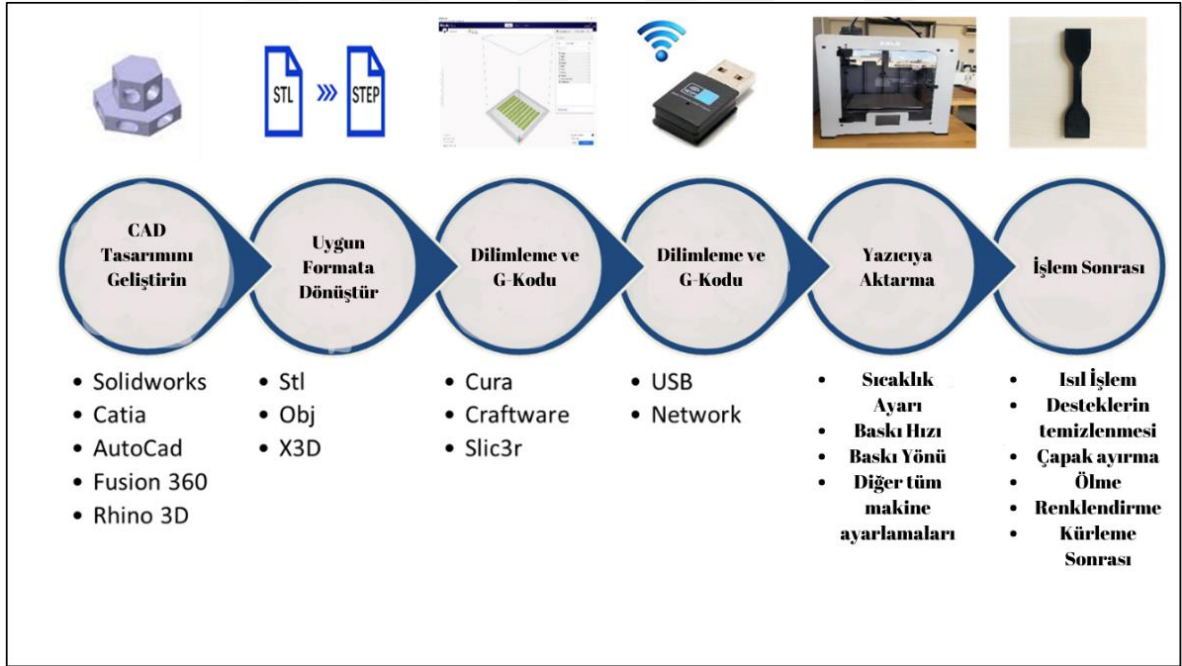


BİRİNCİ BÖLÜM

1. TEKNİK LİTERATÜRE BAKIŞ

1.1. Eklemeli İmalat ve Kullanım Alanları

Eklemeli imalat (Eİ) ya da bir başka ifade ile katmanlı imalat teknolojisi, birçok farklı teknolojiyi kapsayan geniş bir çerçevede yer almakta olup, dijital platformda tasarlanmış nesnelerin fiziksel objelere dönüştürülmesini sağlayan, pratik bir üretim yöntemidir. Bu teknoloji, üç boyutlu (3B) baskı yöntemlerini kullanarak dijital tasarımları somut objelere çevirebilme kabiliyetine sahiptir. 3B baskının temel prensibi, bilgisayar destekli üretim proseslerini temel alan bilgisayar destekli nümerik kontrol (CNC) frezeleme ve tornalama gibi talaşlı imalat yöntemlerinin tersidir. Talaşlı imalat sürecinde, üç boyutlu nesne, bir malzeme bloğundan parçalar kesilip uzaklaştırılarak oluşturulurken, 3B baskı yönteminde tasarlanan üç boyutlu nesne, ardışık olarak oluşturulan malzeme katmanlarının birleştirilmesiyle elde edilmektedir (Sürmen, 2019). Şekil 1, 3B baskı ile yapılan imalatın, tasarım aşamasından nihai ürünün elde edilmesine kadar olan süreci şematize etmektedir.



Şekil 1. 3B baskı (eklemeli imalat) prosesinin adımları (Sürmen, 2019).

3B baskı teknolojisinin tercih edilmesindeki temel sebepler, üretim hattı kurulumu ve kalıp tasarımı gibi ek üretim aşamalarına gerek duyulmaması ve tasarımın hemen üretim sürecine dahil edilebilmesidir. Bu teknolojinin kullanımıyla ilgili bir diğer önemli avantaj, 3B baskı yöntemini kullanan yazıcıların bulut tabanlı üretime olanak sağlamasıdır. Bu sayede, gelen siparişler doğrudan yazıcıya iletilerek, herhangi bir kalıp veya hat ihtiyacı

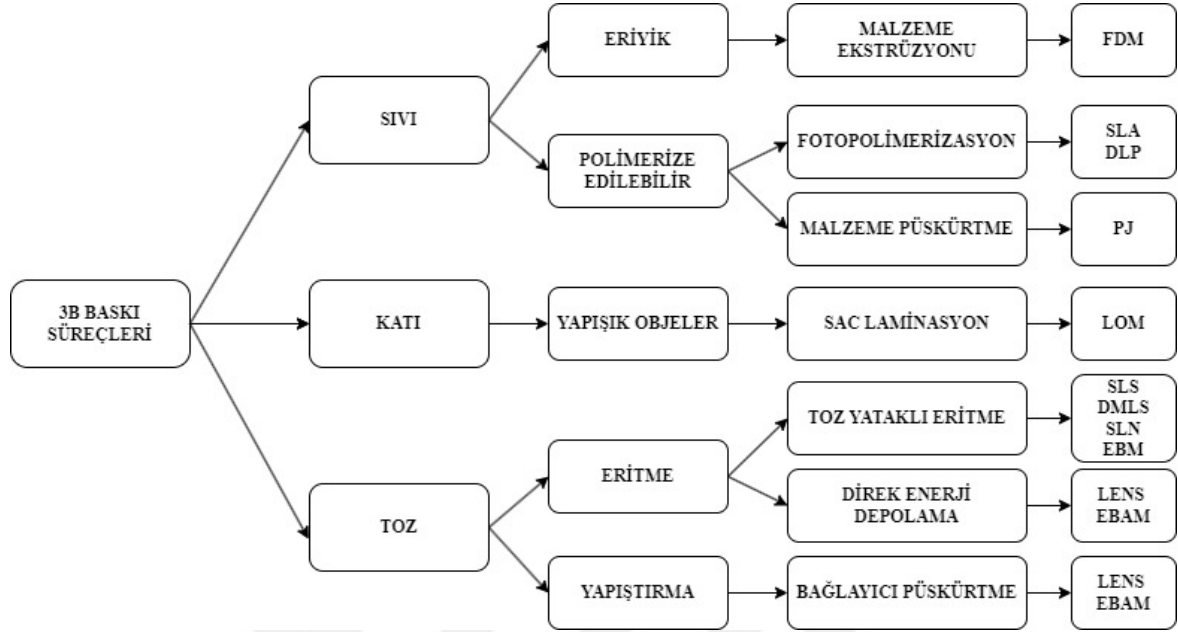
olmadan hızlı bir üretim süreci sağlayan 3B yazıcılarla üretim kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. 3B yazıcılar, bulut teknolojisinin yanı sıra endüstri 4.0' ı oluşturan sensörler, kablosuz iletişim ve robot kollar gibi teknolojileri içerdiği için önemli bir konumda bulunacaktır (Sürmen, 2019). 3B yazıcılar aracılığıyla üretilen çalışma modelleri, geleneksel yöntemlere kıyasla iş gücünden ve zamandan tasarruf sağlayarak düşük maliyetli bir alternatif sunmaktadır (Kasparova vd., 2013).

ISO/ASTM 52900:2015 standardına göre eklemeli (katmanlı) imalat tanımı, 'Talaşlı üretim ve biçimlendirerek şekillendirme yöntemlerinin aksine, 3B model verilerinden parçalar üretmek için malzemeleri katman katman birleştirme işlemidir.' şeklinde yapılmaktadır¹. Standarta göre başlıca eklemeli imalat yöntemleri, yedi ana kategoriye ayrılmıştır. Bunlar¹;

- Malzeme ekstrüzyonu
- Fotopolimerizasyon (Vat-Polimerizasyon)
- Malzeme püskürtme
- Sac/levha laminasyonu
- Toz yataklı eritme
- Doğrudan enerji depolama
- Bağlayıcı püskürtme

¹ <https://doi.org/10.1520/ISOASTM52900-15>

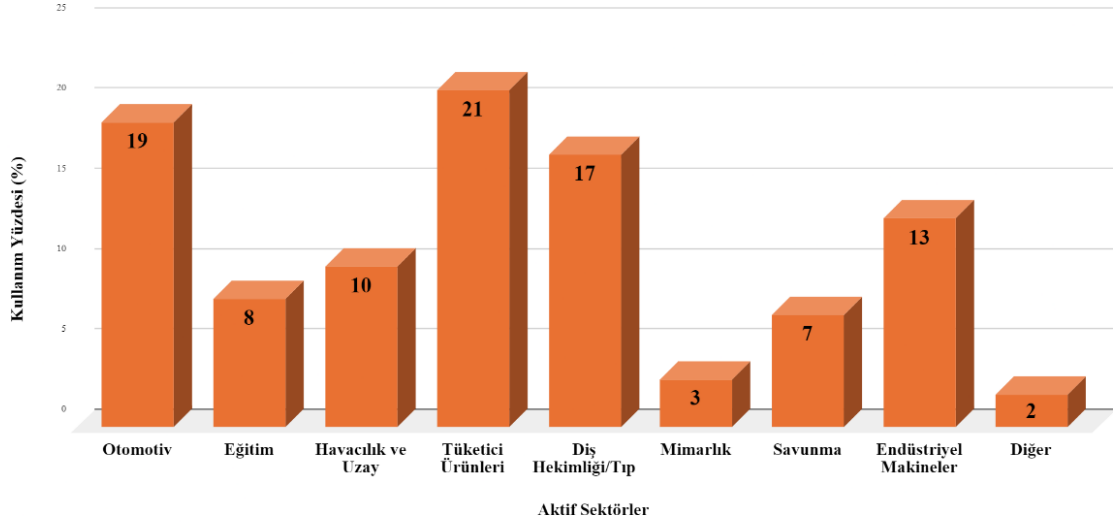
Sık kullanılan eklemeli imalat teknolojileri Şekil 2’ de kategorilere ayrılarak verilmiş ve teknolojilerine ait başlıca özellikler belirtilerek karşılaştırmaları yapılmıştır (Calignano vd., 2012).



Şekil 2. Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması (Calignano vd., 2012).

Üretimde sık kullanılan başlıca teknoloji ve yöntemlerine ait bilgiler ise şu şekildedir. Malzeme Ekstrüzyon yönteminde, FDM teknolojisi ile Termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Fotopolimerizasyon yönteminde SLA, DLP ve CDLP teknolojisi kullanılarak polimer ve seramik malzemeler kullanılmaktadır. Toz yataklı eritme yönteminde SLS, DMLS, SLM, EBM teknolojileri kullanılarak Polimer, Poliamid, metal tozu, seramik tozu gibi malzemeler kullanılmaktadır (Calignano vd., 2012).

Oldukça çeşitli yöntemlere sahip olan eklemeli imalat, günümüzde hızı ve pratikliği ile öne çıkan bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu teknolojiye sürekli olarak yeni yöntemler eklenmekte ve hem endüstri dünyasında hem de akademik çevrelerde büyük ilgi görmektedir. Eklemeli üretim teknolojileri, yüzlerce farklı plastik türünden onlarca metal tozuna kadar geniş bir malzeme yelpazesinde, parçalar üretme imkânı sunmaktadır. Gelecekte, bu ürün çeşitliliğinin ve kullanım alanlarının artmasının kaçınılmaz olduğu öngörülmektedir. Bu perspektif ile bakıldığında, aşağıda verilen Şekil 3’ te ilgili sektörlerdeki kullanım oranları paylaşılmıştır.



Şekil 3. 3B Eklemeli imalat uygulamalarında önde gelen sektörler (Katta, 2019).

Eİ teknolojisi, özellikle medikal alanda ve diş hekimliğindeki gelişmelerle birlikte hızlı bir ivme kazanmıştır (Saheb ve Kumar, 2020). Eİ hem kısmi hem de tam protezlerin tasarlanması ve üretilmesinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Bhargav vd., 2017). Özellikle 3B baskı teknolojisinin, karmaşık morfolojisi olan diş implantlarının üretiminde kullanılması, frezeleme ile tek başına üretilemeyen kemik benzeri implantların üretiminde başarı sağlamıştır (Dawood vd., 2015). Bu teknoloji, özellikle karmaşık geometriye sahip implantların üretimini mümkün kılarak diş hekimliği uygulamalarında çeşitli avantajlar sunmaktadır. İmplantlar, kusurlu veya eksik dokuyu doğrudan veya dolaylı olarak değiştirmek amacıyla üretilmekte ve kullanılmaktadır. Ayrıca, diş hekimliği çalışmalarının bir parçası olarak kronlar ve köprüler gibi dental uygulamalar da Eİ teknolojisinin, kullanım alanına girmektedir. Bu bağlamda, malzemenin doku uyumu büyük önem taşımakta ve uygun malzeme seçimi, başarılı bir tedavi sonucu için kritik bir faktördür (Salmi, 2021).

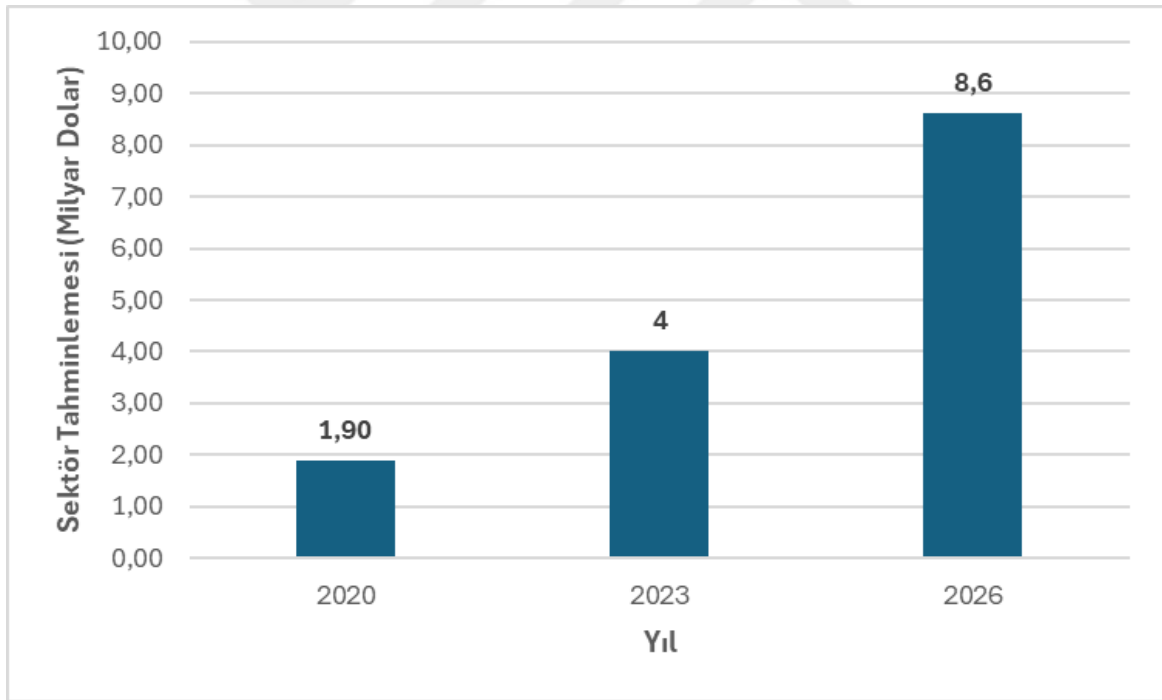
Diş hekimliğinde, geleneksel yöntemlere kıyasla eklemeli üretimin tercih edilmesi avantaj sunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları aşağıdaki gibi vurgulanabilir (Steenberghe vd., 2005).

- Bireysel ihtiyaçlara uygun karmaşık yapıya sahip ürünlerin, düzensizlikler, çukurlar gibi detaylarıyla birlikte, üç boyutlu olarak üretilebilme olanağı vardır. İyi bir tasarım, ürün karmaşıklığını arttırmadan maliyeti optimize edebilir.

- İmalat sürecindeki insan hatalarını minimumda tutar; daha az üretim aşaması gerektiği için müdahale ihtiyacını azaltır.

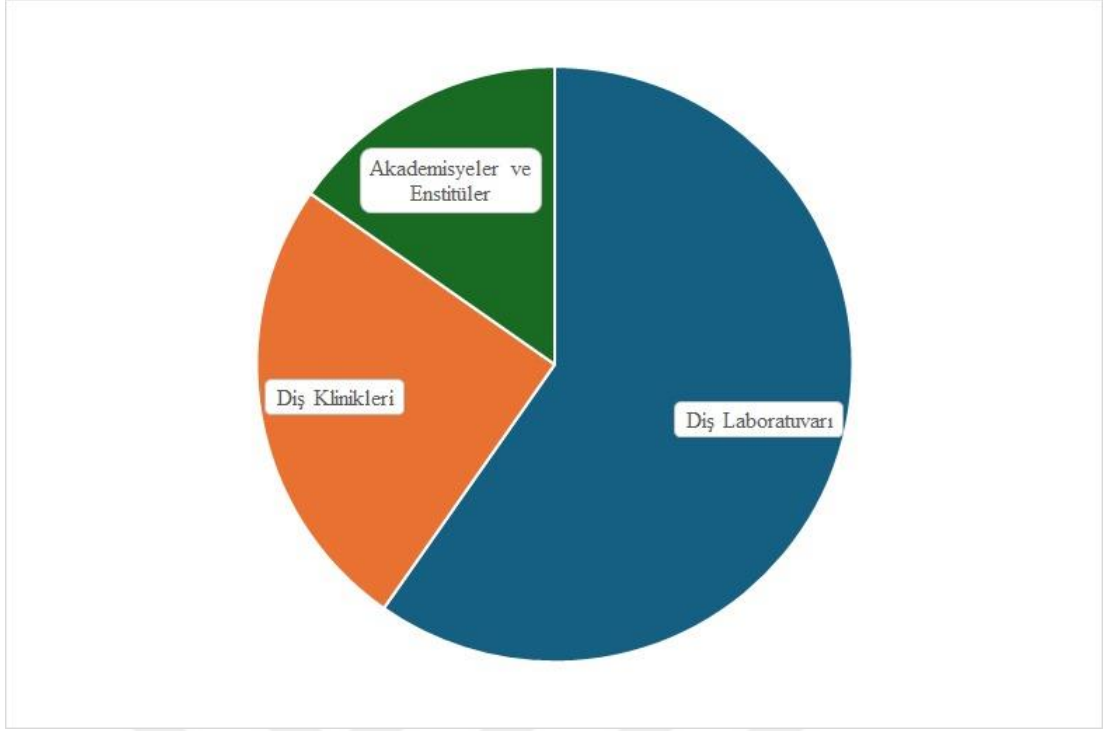
- Ürünlerin üretim süresini ve teslim süresini azaltarak hızlı bir üretim imkânı sağlar.
- Enerji tüketimini ve malzeme israfını azaltır; geleneksel üretim araçlarının, kullanımını ortadan kaldırarak yatırım maliyetlerini düşürür.
- Pasif bir üretim sürecine sahiptir ve frezeleme için ek işçilik gerektirmez.
- Sayısallaştırılmış verilere dayalı detaylı üretim (BT, MRI gibi veriler) imkânı sunar ve tekrarlanabilirlik, daha düşük maliyetle gerçekleştirilebilir.

FDI World Dental Organization verilerine göre, 2.3 milyara yakın insan diş çürümesi nedeniyle 2019 yılında sağlık problemleri yaşamıştır. Bu rakamın yaklaşık %20'si çocuk hastalardır². Bu noktada, özellikle diş hekimliği tedavilerindeki yenilikçi prosesler, doktor niteliğindeki insan kaynağı ve yeni nesil destek uygulamaları (3B yazıcı gibi) gelecekteki sağlıklı popülasyon oranı için kilit rol oynamaktadır. Son yıllarda eklemeli imalata olan küresel ilginin sebebi, bu etkenler nedenli olduğu bilinmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5, küresel seviyede, diş hekimliği odaklı 3B imalatın, pazar hacmini ve sektörün ticari anlamdaki geleceği paylaşılmıştır.



Şekil 4. Dental sektörde 3B imalatın tahmini pazar payı².

²<https://www.medicalplasticsnews.com/medical-plastics-industry-insights/medical-plastics-3d-printing-insights/what-makes-dental-3d-printing-the-new-normal-in-dentistry/>



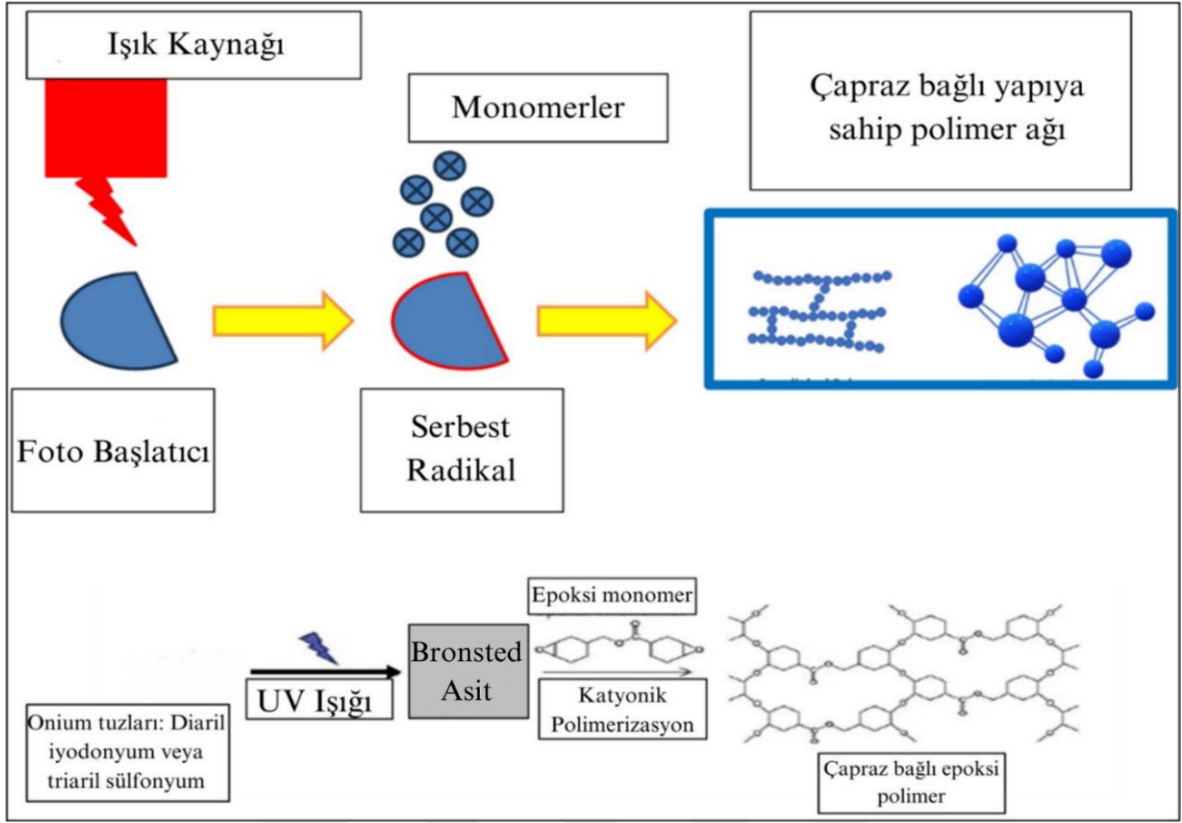
Şekil 5. 2023 yılı dental sektörde, 3B imalatın kullanım alanlarına göre pazar payları³.

1.2. Fotopolimerizasyon Yöntemi

Eklemeli üretim teknolojisinin ilk örneğidir. Bu metot, seramik tozuyla karıştırılan ışıkla işlem görmüş fotopolimer rezin içeren bir kabın içinde, her seferinde bir katman oluşturmak amacıyla belirli bir ışık türü (lazer veya led ışığı gibi) kullanır. Her katmanı oluştururken, ışık sıvı rezinin yüzeyinden geçer. Ardından, levha başka bir rezin katmanının yüzeyine yayılarak alçılır ve bu süreç tekrarlanır (Wu vd., 2016). Işık kaynağı ve maruz kalma enerjisi, her katmanın kalınlığını kontrol eden temel faktörlerdir (Melchels vd., 2010). Bu yöntem, 10 µm'ye kadar çözünürlükte yüksek kaliteli parçalar üretme yeteneğine sahiptir (Wang vd., 2017).

Genel olarak, fotopolimerizasyon işleminin başlayabilmesi için belirli dalga boylarında ışık yayan bir kaynak ve bu ışığa duyarlı bir foto başlatıcı içeren bir molekül gereklidir. Bu foto başlatıcılar sayesinde serbest radikaller aktif olur ve monomer moleküllerin birleşerek çapraz bağlı zincirler oluşturmasını sağlar. Ardından bu kimyasal reaksiyon silsilesi devam eder ve üç boyutlu rijit polimer ağı 100 µm ile 200 µm arasında bir tabaka birikimi ile elde edilir (Endruweit vd., 2006). Şekil 6' da epoksi malzemesi ile fotopolimerizasyon reaksiyon süreci görülmektedir.

³<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/dental-3d-printing-market>



Şekil 6. Epoksi malzemesi ve fotopolimerizasyon reaksiyon süreci (Endruweit vd., 2006).

Geçtiğimiz otuz yıl boyunca, eklemeli üretim teknolojileri, genellikle polimerik veya metalik malzemelerden prototip veya modeller üretmek amacıyla kullanılmıştır. Ancak, son zamanlarda, özellikle seramik malzemelerin üretimi eklemeli üretim içinde giderek daha fazla popülerlik kazanmıştır (Zocca vd., 2015). Eklemeli üretim teknolojisi kullanılarak yapılan seramiklerle ilgili yapılan son araştırmaların büyük bir kısmı, özellikle polimerizasyon temelli teknolojilere odaklanmaktadır (Yang ve Miyanaji, 2017; Halloran, 2016). Bu noktada SLA öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, yüksek oranda seramik dolgulu ve ışıqla sertleşen bir bağlayıcı kullanılmaktadır. Bağlayıcının ışıqla sertleşmesini sağlamak için, daha iyi ışık saçılma özelliklerine sahip olan daha küçük seramik parçacıkları tercih edilmektedir (Travitzky vd., 2014).

Eklemeli üretimde dental ve tıbbi kişiselleştirme, büyük bir öneme sahiptir. Bu teknoloji sayesinde hastanın özel ihtiyaçlarına uygun, belirli özelliklere sahip çeşitli ürünlerin üretilmesi, bu yöntemin temel avantajlarından biridir. Örneğin, tanı platformları, ortopedik ve dental implantlar, ilaç üretim sistemleri, tıbbi cihazlar, yapay dokular ve organlar gibi çeşitli medikal ürünler, kişiselleştirilmiş şekilde üretilmektedir (Chia ve Wu, 2015; Sachlos ve Czernuszka, 2003).

Eklemeli üretim teknolojisinin hareketli protezler için en eski kullanımı, 1994 yılında Maeda ve ark. tarafından SLA yöntemi ile ışıkla sertleşen reçine kullanarak total protez üretilmesidir. O zamandan beri, tam protezlerin imal edilmesinde eklemeli üretim teknolojilerini dahil etmek için farklı yöntemlerin çeşitli tasvirleri olmuştur (Maeda vd., 1994). Bilgin ve ark. digital light processing (DLP) yöntemini kullanarak nano mikro hibrit doldurucu rezin dişler içeren tek parça tam protezler üretmişlerdir (Bilgin vd., 2015). Park ve ark. SLA yöntemiyle üretilen fotopolimerize yapay dişlerin kırılma dirençlerinin, geleneksel geçici dişlere göre yeterli olduğunu belirtilmişlerdir (Park vd., 2015). Wu ve ark. SLA yöntemiyle üretilen iskelet modellerini geleneksel yöntemlerle üretilmiş olanlarından daha başarılı olduğunu bulmuştur (Wu vd., 2012). Koh ve ark. çeşitli renklendiricilerde, SLA ile üç boyutlu üretilmiş dişlerin renk stabilitesini, farklı yapıdaki dişlerle karşılaştırmış, aralarında anlamlı bir fark bulmamışlardır (Koh vd., 2020). Xing ve ark. SLA yöntemiyle yüksek boyutsal hassasiyete sahip kompleks zirkonya seramikler üretmiş, bu seramiklerin çıkarmalı yöntemle üretilmiş zirkonyaya yakın mekanik özelliklere (kırılma tokluğu ve sertliği) sahip olduğunu bildirilmişlerdir (Xing vd., 2017).

Diş hekimliği özelinde, aşınma, korozyon, basma dayanımı gibi fonksiyonel özellikler, üretim sürecinde reçine bazlı kombine etkileşimlerin, incelenmesi bakımından büyük öneme sahiptir. Bu bağlamda, dişçilik uygulamalarında kullanılan reçinelerin fotopolimerizasyon özelliklerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi hem fiziksel hem de mekanik özelliklerin belirlenmesi için önemlidir. İleri düzeyde yenilikçi çalışmaların yürütülebilmesi için diş hekimliği reçinelerinin fotopolimerizasyon süreçlerinin derinlemesine incelenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Aşağıdaki Şekil 7’ de, 3B ile üretilmiş güncel diş hekimliği uygulamaları şematize edilmiştir.



Şekil 7. Diş hekimliğinde 3B baskı ile üretilmiş gerçek uygulamalar

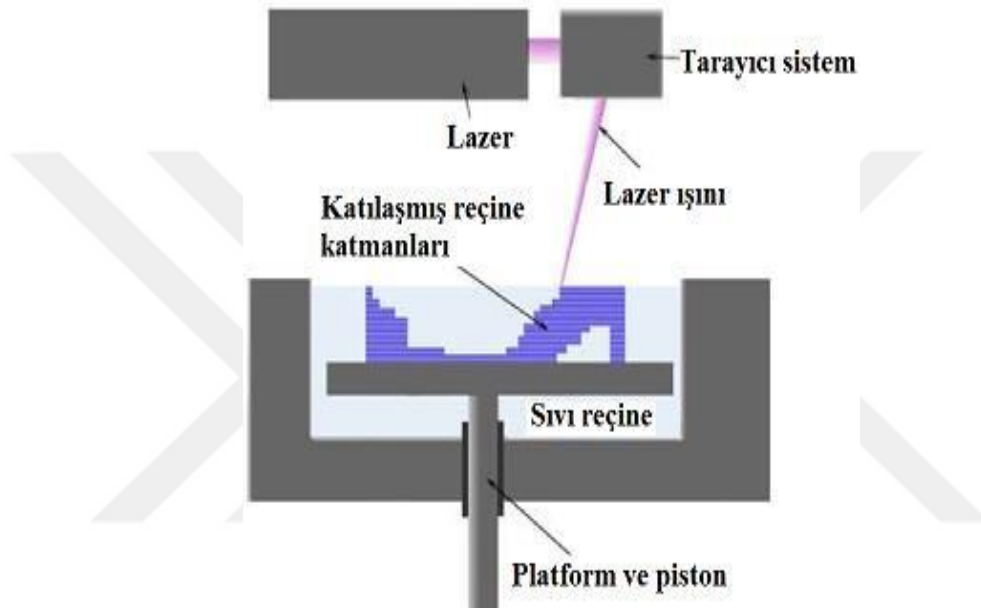
1.2.1. Fotopolimerizasyon Esaslı 3B Baskı Teknikleri

Eklemeli imalatla Fotopolimerizasyon teknikleri SLA, DLP ve CDLP olmak üzere 3 çeşittir. DLP imalat yöntemi, hemen hemen SLA ile aynı prensibe sahiptir. SLA ve DLP arasındaki temel fark, DLP’ de projektör tarafından ultraviyole ışık ile tabaka sertleştirilirken, SLA’ da ise, lazer kaynağı ile ışığa duyarlı reçineler katmanlar halinde sertleşmektedir. Bu nedenle, DLP’ ye göre SLA daha hassas ve daha yavaş bir imalat işlemi olarak nitelendirilmektedir. CDLP ile, DLP’ ye benzer prensiple parça imalatı yapılmakta ve aralarındaki temel fark ise CDLP’ de, katman imalatı sırasında imalat plakası Z yönünde yukarı doğru sürekli hareket etmektedir. İlk katman katı hale geldikten sonra bu katman, reçine havuzundan yukarı doğru çıkarılır ve inşa edilecek sıradaki katman, projektör tarafından gelen ışığın etkisinde katılaştırılarak imalat gerçekleştirilmektedir (Redwood, 2017).

1.2.1.1 Stereolitografi (SLA)

SLA teknolojisi, oda sıcaklığında bulunan sıvı fotopolimer reçine tabakasının, ultraviyole lazer ışını aracılığıyla belirlenmiş geometrik veriye göre kürleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu kürleştirme işlemi, temel olarak eklemeli imalat mantığına dayanan 3B yazıcı teknolojilerinin merkezinde yer almaktadır. Her bir katman, önceden

oluşturulmuş G-kod verilerine dayanarak 3B dilimleyici yazılımı kullanılarak tasarlanır. Bu verilere göre hareket eden lazer ışını, reçine tabakasını taramak suretiyle kürleştirme işlemini gerçekleştirir. İlk katman kürleştirildikten sonra inşa platformu, bir katman yüksekliği kadar hareket eder ve üzerine yeni bir reçine tabakası uygulanır, bu süreç tekrarlanarak devam eder. Katmanlar birbirine eklenerek, nesnenin tamamı üretilir. Bu yöntem, belirli bir geometriye sahip olmayan sıvı reçinden detaylı ve karmaşık, pürüzsüz 3B nesneler elde etmeyi mümkün kılar. Üretime ait şematik gösterim Şekil 8’ de paylaşılmıştır (Chaput ve Chartier, 2007).

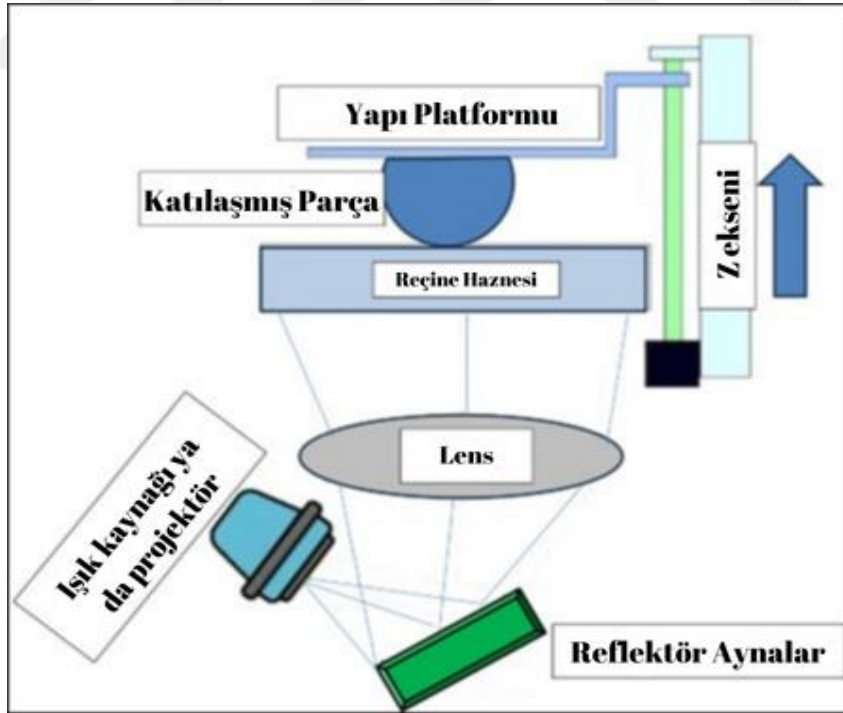


Şekil 8. SLA’ nın çalışma prensibi (Oropallo ve Piegl, 2016).

SLA tipi 3B yazıcılarında diğer tüm alternatif uygulamalarda olduğu gibi bazı öne çıkan avantajları ve dezavantajları mevcuttur (Dawood vd., 2015). SLA yazıcılar için karmaşık geometrilerin keskin bir doğruluk ile imal edilebilme kapasitesi ciddi bir avantaj olarak sayılabilir. Çok sayıda ürünlerin imalatı için, atölye tipi çoklu tezgahların aynı anda kullanılması ile ekonomik özellik kazanabilir. Özellikle son ürün yüzey kalitesi bakımından oldukça başarılıdır ve temizleme dışında sekonder yüzey işlemlerine gerek duymaz. Ek olarak, günümüzdeki artan rekabet ve hız dengesi göz önüne alındığında, günlük ürün imalat hızı tasarımın boyutuna göre oranlandığında yüksektir. Öte yandan bu tekniğin bazı handikaplarına da değinilir ise, üretilen yüksek rijitlikteki parçalar termoplastik rakipleri ile kıyaslandığında, kırılgan bir davranış gösterme eğilimindedir. Seri üretim konusu bir diğer karmaşık durumdur ve SLA ile otomasyonu birleştirmek zahmetli bir iştir. Ayrıca malzemenin sadece foto-polimer esaslı olması zorunluluğu ve destek yapıların üretim sonrası ayrılması gibi işlemlerde bu yöntemin öne çıkan zorluklarıdır.

1.2.1.2. Dijital Işık İşleme (DLP)

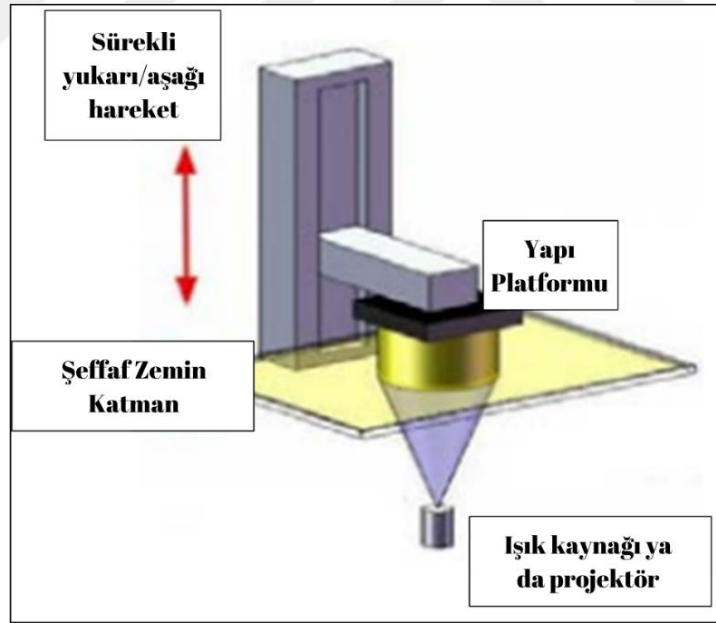
DLP tabanlı 3 boyutlu üretim, hızlı baskı, mükemmel ölçeklenebilirlik ve kullanımı kolay çalışma koşulları ile öne çıkan bir üretim yöntemidir (Schmidleithner ve Kalaskar, 2018). Bu teknikte, bağımsız olarak açık veya kapalı konuma getirilen aynadan oluşan bir dijital ayna mekanizması kullanılmaktadır. Şeffaf plaka üzerine iki boyutlu bir piksel deseni yansıtılarak tek seferde bir tabaka reçine sertleştirilmektedir. Objelerin tamamlanma süresi, x-y düzlemindeki boyutlara ve aynı anda üretilen objelerin sayısına değil, sadece katman kalınlığına bağlıdır. Bu nedenle daha hızlı bir üretim süreci elde edilmektedir (Zhao vd., 2020). DLP tekniğinin en önemli avantajlarından biri yüksek hassasiyettir. Ancak, bu yüksek hassasiyet genellikle küçük boyutlu üretimde garanti edilmektedir ve bu özellik, özellikle diş hekimliği alanında sıkça tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir (Lu vd., 2006). İki boyutlu piksel oluşturan ışığı sayesinde bu yöntem nispeten daha süratli bir tekniktir ve yüzey kalitesi bakımından son ürünler oldukça düzgündür. Öte yandan, foto-polimerizasyon temelli malzemeler ile sınırlı olması ve imalat sonrası destek yapıların kimyasal veya mekanik metodolojiler ile ana gövdeden ayrılması durumları temel handikaplardır. DLP yönteminin şematik gösterimi Şekil 9’ de gösterilmiştir.



Şekil 9. DLP yönteminin proses şeması (Agashe vd., 2020).

1.2.1.3. Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP)

Sürekli sıvı ara yüz üretimi olarak da bilinen dijital ışık projeksiyonu, oksijen geçirgen mercekler ve programlanabilir sıvı reçine kullanarak yüksek mekanik özelliklere sahip, yüksek çözünürlüklü parçalar üretmek için kullanılan yeni bir eklemeli imalat teknolojisidir. CDLP teknolojisi, DLP teknolojisinin işleyiş mantığına benzer ve inşa platformu Z ekseninde sürekli hareket halindedir, bu da parçaların daha kısa sürede tamamlanmasını sağlar. Sürekli sıvı ara yüz üretimi, UV projeksiyon düzleminin altındaki oksijeni geçiren bir pencere kullanarak, fotopolimerizasyonun pencere ve polimerleştirici kısım arasında inhibe edildiği bir "ölü bölge" (kalıcı sıvı arayüzü) oluşturur. Ayrıca CDLP teknolojisi ile karmaşık katı parçalar, reçine kullanılarak saatte 100 mm değerinin üzerinde bir basım hızıyla üretilebilmektedir. Bu yüksek basım hızı, 3D baskının saatler süren bir işlem olmaktan çıkıp dakikalar içinde gerçekleştirilebilmesine olanak tanır. CDLP teknolojisi, yumuşak elastik malzemeler, seramikler ve biyolojik malzemeler gibi çeşitli materyallerin kullanılmasına da imkân sağlar (Shirvanyants vd., 2015). CDLP yönteminin şematik gösterimi Şekil 10' de gösterilmiştir.



Şekil 10. CDLP yönteminin proses şeması (Wallace vd., 2014).

CDLP tip 3B yazıcılar için genellikle düşük vizkoziteli standart reçineler tercih edilir ve bu nedenle katmanlar arasında güçlü bir arayüzey geçiş bağlantısı sağlayan tasarımlar elde edilebilmektedir. Buna karşın, optimum imalat parametrelerinin ayarlanmaması ya da reçine üreticisinin tavsiyelerinin dışında gerçekleşen pozlama işlemleri nedeniyle delaminasyon tipi kusurlar ortaya çıkabilmektedir (Dean vd., 2012; Shin ve Becher, 2020).

1.3. Diş Hekimliği Uygulamalarına Yönelik Reçine Çeşitleri

Eklemeli üretim teknolojisi, milenyumun başından bu yana dental sektörde başarıyla uygulanan polimerler, metaller ve alaşımları içermektedir. Bu dönemde diş hekimliği alanında metal alaşımlarının işlenmesinde kullanılan lazer sinterleme yöntemi, önemli bir ilerlemeyi ifade etmektedir. Bu alandaki araştırmalar genellikle Krom-Kobalt, Titanyum ve Nikel alaşımları gibi malzemelerin kullanıldığı yapıların üretimine odaklanarak, sektöre katkı sağlamıştır (Marcenes vd., 2013). Üretim doğruluğunun yanı sıra, kullanılan malzemenin biyouyumluluğu, kimyasal kararlılığı ve performans stabilitesi de kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, eklemeli üretim teknolojisine uygun olan reçinelerin kimyasal bileşimleri özel olarak ayarlanmalıdır. Reçine, her katmandan sonra yazıcının platformu ile teknenin arasında doğru bir viskoziteye sahip olarak kolayca akabilmelidir. Dolgu maddeleri, pigmentler ve foto başlatıcı ajanların eklenmesi, malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemenin yanı sıra doğruluğunu da etkiler. Reçine ve içerilen maddeler arasındaki kırılma indeksi düzgün bir şekilde ayarlanmazsa, lazer ışığı saçılır ve bu durum polimerizasyon derinliğinin azalmasına ve sonuç olarak üretilen nesnenin doğruluğunun kaybolmasına neden olabilir (Marcel vd., 2020).

Değişen imalat opsiyonlarına, günden güne gelişim gösteren polimerik reçine formülasyon çalışmalarına ve disiplinler arası bilgi aktarımına bağlı olarak, diş hekimliği, biyomedikal ve tıp eğitimi özelinde fotopolimerizasyon ile yapılan üretim yönteminde sıklıkla kullanılan reçine tipleri Şekil 11’ de verilmiştir.



Şekil 11. Diş hekimliği, biyomedikal ve tıp odaklı reçine türleri.^{4 5}

Diş hekimliğinde seramik malzemelerin yaygın kullanımı, bu malzemelerin üstün biyoyoumluluk, kimyasal stabilite, uygun mekanik özellikler ve yüksek estetik gibi belirli bir dizi avantajına dayanmaktadır. Ancak, seramiklerin kırılma eğilimi, dental restorasyonlarda uygun mekanik özelliklere sahip ürünler elde etmek için üretim sürecinde oldukça titiz bir kontrol gerektirmektedir. Bu özelliklere sahip olmalarından dolayı, uzun bir süre boyunca eklemeli üretim teknolojilerinde genellikle polimer veya metalik malzemeler kullanılırken, seramikler ancak son zamanlarda bu teknolojiye kullanılan malzemeler arasında kendine bir yer bulmuştur. Seramik malzemelerin işleme yöntemleri oldukça karmaşık ve detaylıdır (Zocca vd., 2015). Eklemeli üretim teknolojisi ile üretilen seramiklere odaklanan son araştırmaların büyük bir kısmı, özellikle SLA temelli yöntemlere odaklanmıştır (Halloran, 2016). Polimerik reçinelere dağıtılmış mikro partiküllü seramik malzemeler polimerin kürlenmesinin ardından fırın sinterleme işlemleri ile tekil olarak elde edilebilir. Örneğin, Dehurtevent ve ark. SLA yöntemi ile 50 µm tabaka kalınlığı ile akrilik reçine vasıtasıyla üretilen farklı bileşimlerdeki alumina seramiklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini aşındırıcı üretim sistemleri ile üretilenlere benzer kabul edilebilirlik gösterdiğini bulmuşlardır (Dehurtevent vd., 2017).

⁴ <https://www.zongheng3d.com/sla-3d-printer-resin-types/>

⁵ <https://www.dokuzkimya.com/products/alias-dental-temp-recinesi>

Xing ve ark. ise SLA yöntemiyle zirkonya seramikler üretmişler (akrilik reçinede hacimce %50 zirkonya) ve mekanik özelliklerin ağız içi uygulamalar için geleneksel alternatiflere kıyasla rekabet edebilen bir seviyede olduğunu göstermişlerdir (Xing vd., 2017).

1.3.1 Dental İmplantlar

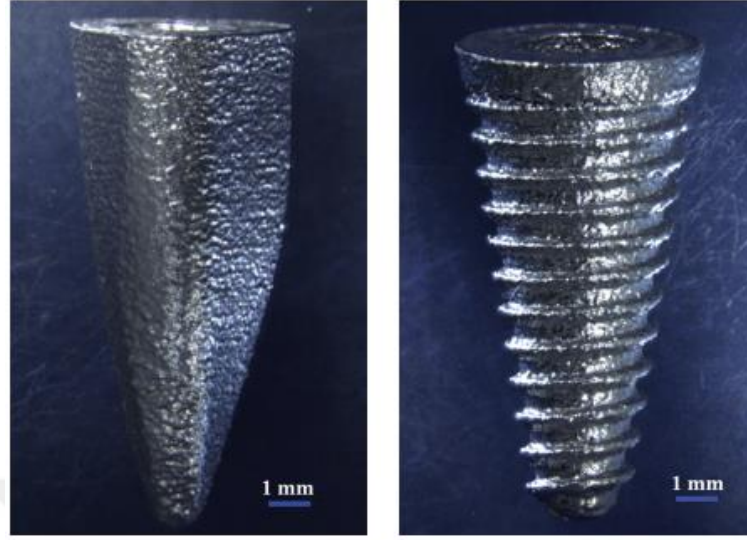
Son yıllarda, artan estetik kaygılar ile beraber sağlıklı bir ağız yapısı da birçok insan tarafından hassasiyetle dikkate alınmaktadır. Bu noktada, implant tedavisi ve estetik diş cerrahisi hem güzel bir dış görünüş hem de konforlu bir ağız yapısı açısından önemli bir talep seviyesine erişmiştir. Diş hekimliğine entegre edilen 3B baskı teknolojileri ile beraber hızlı ve mukavim implant malzemeleri üretmek oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Dental implantların kullanım sıklığı ve sürekli artan talep dikkate alındığında, farklı perspektiflerden birçok noktada hasta ve doktor beklentileri oluşmaktadır. Bu durum, hem biyomedikal, makine, malzeme ve imalat mühendislerinin hem de tıp ve diş hekimliği disiplinlerinin ortak hareketleriyle aşılabılır. Şekil 12 üzerinde bir cerrahi implanttan beklenen özellikler gösterilmiştir.



Şekil 12. Diş implantından beklentiler

Chen ve ark. seçici lazer eritme tekniği ile üretilen yeni bir özel yapım diş implantının mekanik ve biyomekanik performansını simülasyon ve deneysel çalışmalarla değerlendirmektedir. Fabrikasyon implantlarla rekabet edebilen yüksek mukavemete sahip implantlar üretmişlerdir ve bu implantların granül bir yüzeye sahip olduğunu bildirmişlerdir

(Chen vd., 2014). Şekil 13’ de paylaşılan titanyum malzemeden üretilmiş, düz ve vidalı implantı üretmişlerdir.



Şekil 13. SLM yoluyla üretilen titanyum implantlar; düz (sol) ve vidalı (sağ) (Chen vd., 2014).

Diğer bazı benzer çalışmalara bakılırsa, üç boyutlu yazıcılarla üretilmiş metalik implantlar da çeşitli geometrilerde gözenekli yüzeylerin olduğu bildirilmiştir (Peng vd., 2016; Shaoki vd., 2016; Ramakrishnaiah vd., 2017). Ramakrishnaiah ve ark. çalışmalarında Ti-6Al-4V malzemesinden seçici lazer teknolojisi ile ürettikleri diş implantı ile yüzey pürüzlülüğü, yüzey kimyasal bileşimi ve mikroyapı gibi özellikleri incelemişlerdir (Ramakrishnaiah vd., 2017). Hyzy ve ark. geleneksel yöntemle üretilmiş yüzeye kıyasla benzer veya arttırılmış pürüzlülük oluştuğunu saptamışlardır (Hyzy vd., 2016). Osman ve ark. eklemeli yöntem ile üretilmiş kişiye özel zirkonya dental implantların yeterli boyutsal hassasiyete sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bu sistemle üretilmiş implantların mekanik özelliklerinin, geleneksel yöntemlere yakın bükülme direnci gösterdiği bildirilmiştir (Osman vd., 2017). Koç ve ark. metal esaslı malzemelerin eklemeli imalat yöntemiyle şekillendirilmesinin avantajlarına değinmiştir. Eklemeli üretimde kullanılan metal tozlar, özellikleri ve kullanım alanları biyomedikal alan ekseninde tanıtılmıştır. 3B baskı ürünler, standart üretim metotlarıyla şekillendirilmiş ürünlerle karşılaştırılmış, mekanik ve fiziksel özellikleri doğrulandığını göstermişlerdir (Koç ve Yılmaz, 2016). Şekil 14’ de DMLS yöntemi ile CoCrMo alaşımı ve Tİ64 malzemesinin dişçilik alanındaki uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 14. CoCrMo ve Ti64 alaşımlarının dental alandaki uygulaması (Koç ve Yılmaz, 2016).

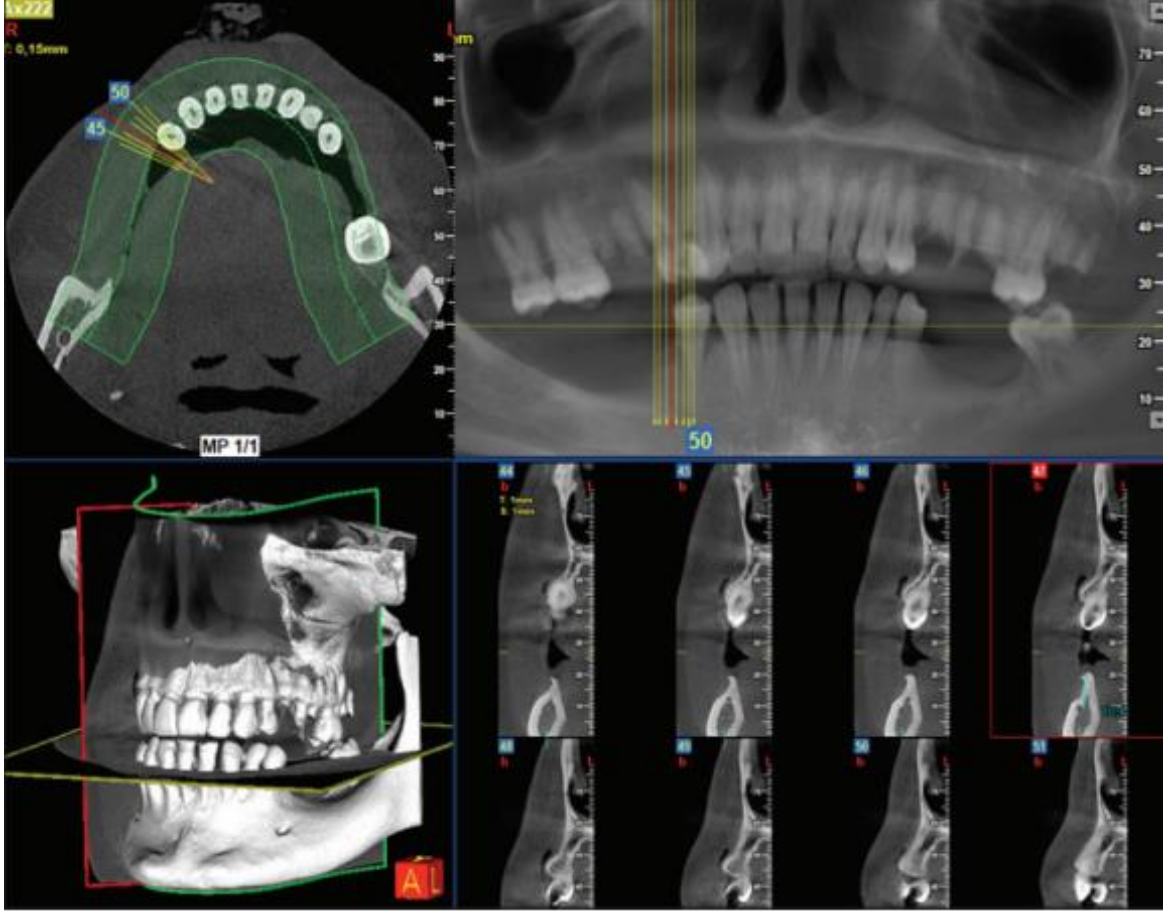
Eklemeli imalatın dental alandaki gelişimi, diş hekimliği uygulamalarında önemli değişikliklere yol açmıştır. Geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, daha hızlı ve maliyet açısından daha ekonomik bir üretim seçeneği sunmaktadır. Hastaların çeşitli diş tedavileri için gereken birden fazla randevuya ihtiyaç duymalarının aksine, tek seansta, kişiye özel tasarımlarla ve geniş bir malzeme yelpazesıyla hizmet almaları bu imalat yönteminin dental alanda hızla ilerlemesine neden olmuştur.

1.3.2 Ortodonti ve Dijital Ortodonti

Eklemeli üretim, diş hekimliği alanında, ortodonti dahil olmak üzere, kişiselleştirme ve yeniden üretme imkanlarını sağlayarak önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji, özellikle ortodontik amaçlar doğrultusunda kullanılarak, hassas, doğru ve tekrarlanabilir dental modellerin oluşturulmasını mümkün kılar (Hazeveld vd., 2014). Özellikle, tel tedavisine alternatif olan estetik yönü güçlü hizalayıcılar, çene hizalayıcı aparatları ve protez prototiplerin imalatında 3 boyutlu yazıcı teknolojilerine olan ilgi ve kullanım günden güne artmaktadır.

Ortodontik tedavi öncesinde tedavi planının oluşturulabilmesi için, dijital ortodonti yöntemi kullanılır. 3B ağız içi tarama ile dijital ortamda hastanın bilgileri elde edilmektedir. Bu yöntem geleneksel yöntem olan, büyük ölçü kaşıklarının kullanılmasına ihtiyaç bırakmadığı için büyük kolaylık ve avantaj sağlamaktadır. 3B tarayıcı ile elde edilen ölçüler ile modelleme yapılarak hasta için ihtiyaç olunan ürün, üretime hazır hale getirilir. Ortodontik analiz ve tedavi planlaması ile vaka analizi, ortodontik tedavilerin simüle edilmesi, diş çekimleri, ara yüz aşındırma ve diş hareketlerinin tüm ayrıntılarının

incelenmesi mümkündür. İş sonu kapanışın gerçek zamanlı olarak uygulanabilmesi, tedavi önerilerinin zaman kaybetmeden sanal olarak değerlendirilmesi, tedavinin özelleştirilmesi, braketlerin yazılım kullanarak hatasız konumlandırılması, planlanan aşamalar ve tedavinin ön izlemesi dijital olarak yapılabilir. Dijital diş hekimliğinde modeller, 3B tarama ile sanal ortamda elde edilerek, büyük metal kaşıklar kullanılmadığından özellikle öğürme refleksi olan kişilerin tedavileri kolaylaşmıştır. Doğuştan üst çene, yan kesici dişleri olmayan bir hastanın bilgisayarlı tomografi görüntüsü Şekil 15’ de gösterilmiştir.



Şekil 15. Çene-yüz operasyonları için örnek bir BT tarama görüntüsü (Miracle ve Mukherji, 2009; Aditya vd., 2015).

Klinik uygulamalarda geleneksel bilgisayarlı yaklaşımlar hala devam etmektedir. Daniel ve ark. flepsiz cerrahi tekniğiyle, bilgisayarlı tomografi (BT) görüntülerine dayanan bir tedavi planlama prosedürü ve üst çenenin derhal yüklenmesi için sabit protez rekonstrüksiyonunu içeren konsepti değerlendirip protokolün başarılı olduğunu bildirmişlerdir (Van vd., 2005). Eufinger ve ark. BT verilerine dayanarak implantın ameliyat öncesi modellemesi için CAD/CAM tekniklerini incelemiş, kranyofasiyal kemik defektlerinin, tomografi verisine dayalı bireysel implantlarla rekonstrüksiyonunun, geleneksel yöntemlerden daha üstün olduğunu belirtmişlerdir (Eufinger vd., 1995). Öte

tarafından, eklemeli imalatın performans yönünü vurgulamak isteyen bir diğer çalışmada, Revilla-Leon ve ark. bir koordinat ölçme makinesi kullanılarak alçı model ve eklemeli üretim ile üretilen polimerlerden yapılan tam dişsiz modellerdeki implant analog pozisyonlarının doğruluğunu analiz edip, aralarında anlamlı bir fark olmadığını bildirmişlerdir (Revilla-Leon vd., 2018).

1.3.3 Cerrahi Kılavuzlar ve Modeller

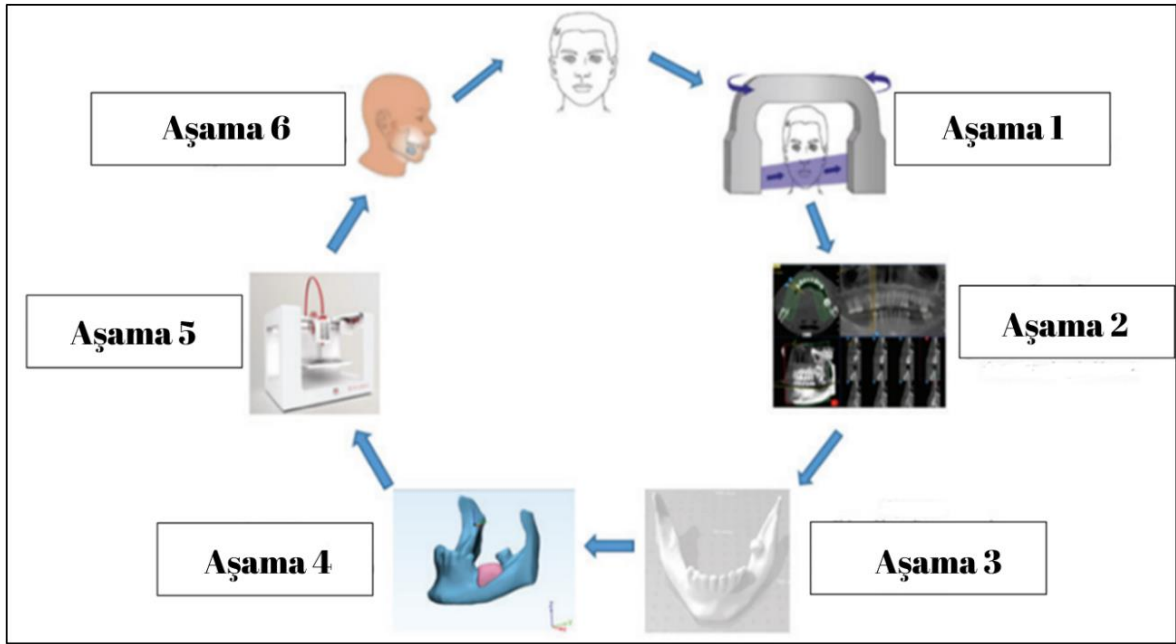
Katmalı olarak yazıcı vasıtasıyla hazırlanan cerrahi kılavuzlar, implantların doğru pozisyon ve açıda yerleştirilmesine yardımcı olur. Cerrahi kılavuz üretilirken implantın yerleşeceği bölgeler planlama aşamasında belirlenir ve ilk frezin geçeceği merkezleme kılavuzları belirlenir. Bazı örnek kılavuz modelleri Şekil 16’ de gösterilmiştir. Bu kılavuzların seri ve hızlı imalatı, hızlı muayene ve cerrahi operasyon imkânı sunmaktadır. Bu durum ise yenilikçi üç boyutlu baskı teknolojilerine aşina olan klinikleri diğerlerine nazaran ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 16. Farklı boyut aralığına sahip cerrahi kılavuzlar (Lozada vd., 2014).

Eklemeli üretim, tıbbi modelleme alanında kullanılan ve anatomik çalışma modellerinin üretilmesini sağlayan bir teknoloji olarak da öne çıkmaktadır. Bu modeller sayesinde, karmaşık anatomiye detaylı bir şekilde inceleyerek cerrahi işlem öncesi planlama yapmak mümkündür. Bu modeller, tanı, cerrahi öncesi planlama ve cerrahi işlem sırasında referans olarak kullanılabilme özelliklerine sahiptir. Bunlara ek olarak, eklemeli üretim, sadece diş hekimliğinde ağız içi ya da oral uygulamalarda değil, aynı zamanda çene-yüz cerrahisi alanında da son dönemlerde sıklıkla kullanılmaktadır (Erickson vd., 1999; Xia vd., 2000).

Diş hekimliğinde cerrahi kılavuz ve model üretim aşamaları Şekil 17’ de gösterilmiştir. Bu aşamalar şu şekilde sıralanabilir; (1. aşama) hastadan konik ışınlı bilgisayarlı tomografi görüntüsünün alınması. (2. aşama) Konik ışınlı bilgisayarlı tomografiden elde edilen görüntülerden DICOM uzantılı dosyaların kaydedilmesi. (3. aşama) Elde edilen DICOM uzantılı dosyalar ile üç boyutlu tasarım yaparak STL uzantılı modelin elde edilmesi. (4. aşama) Elde edilen STL uzantılı model üzerine üç boyutlu kemik implantı tasarlanması. (5. aşama), Tasarlanan kemik implantının 3B yazıcıda basılması. (6. aşama), 3B basılı kemik implantının hastaya uygulanması (Frizziero vd., 2020; Yu vd., 2019).

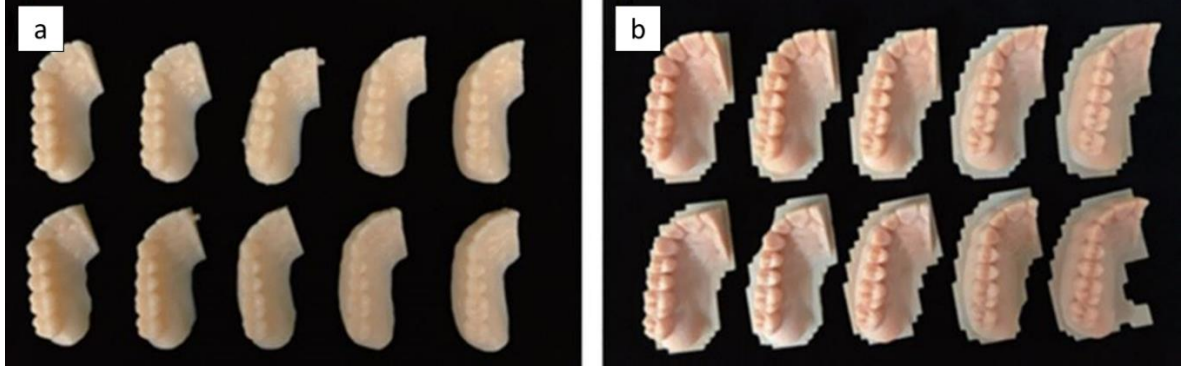


Şekil 17. Diş hekimliğinde model ve cerrahi kılavuz üretimi için 3B baskı aşamaları

1.4. Eklemeli İmalat ile Üretilen Komponentlerde Fiziksel Özellikler

Fiziksel özelliklerin incelemesi üzerine yapılan çalışmalar, eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin geleneksel yöntemlerle üretilenlerden eksik olmadığı doğrulanmıştır. Özellikle CAD/CAM odaklı ve geleneksel döküm temelli uygulamaların kullanım geçmişinin daha eski olduğu düşünülürse, 3B baskı teknolojilerinin hem imalat hızı olarak hem de üretilen diş protezi, model ve implant gibi komponentlerin boyutsal doğruluğu açısından oldukça cazip bir alternatif olduğu söylenebilir. Diş hekimliği uygulamaları özelinde, tasarım, kullanım, performans ve estetik ekseninde bazı fiziksel özellik çıktıları önem arz etmektedir. Kişisel ağız yapısı ve çene profiline özgü model analizleri için, son yıllarda hem deneysel hem de sonlu elemanlar destekli bilimsel çalışmalar yoğunlaşmıştır. Jeong ve ark. farklı yöntemlerle (CAD/CAM temelli frezeleme ve 3B baskı) üretilmiş dental modellerin boyutsal doğruluğunu değerlendirdikleri çalışmalarında, eklemeli üretimin daha başarılı

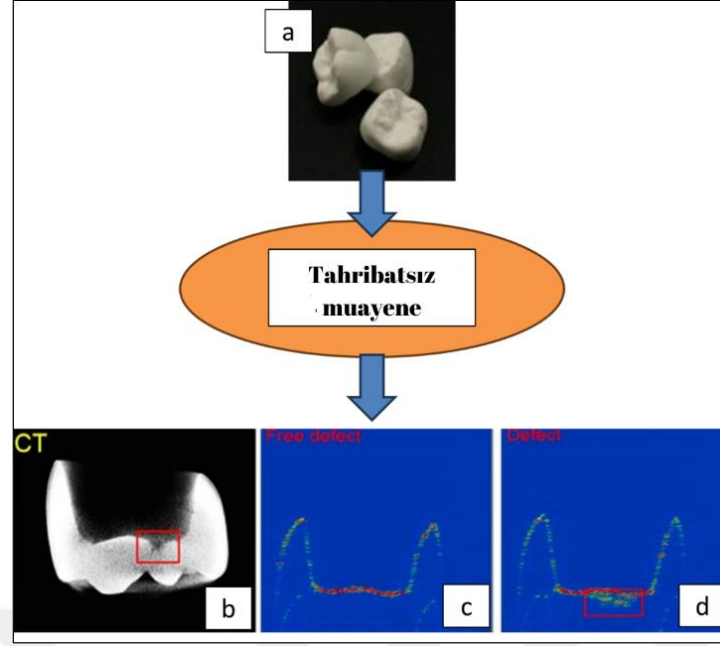
olduğunu belirtmişlerdir (Jeong vd., 2018). Katmalı imalatın oluşturduğu detay derinliği ve tasarım keskinliği Şekil 18 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 18. Frezeleme (a) ve 3B baskı (b) arasındaki hassasiyet farkı (Jeong vd., 2018).

İmplant konum ve pozisyonları ile ilgili olarak, Revilla-Leon ve ark. alçı ve eklemeli üretim ile elde edilen polimer modellerdeki implant analog pozisyonlarının doğruluğunu analiz ederek, aralarında anlamlı bir fark olmadığını bildirmişlerdir (Revilla-Leon vd., 2018). Özellikle, 50 µm ile 100 µm arasında değişen katman baskı kalınlıkları ile DLP ve multijet printing (MJP) teknolojileri ile üretilen örneklerin alışlagelmiş alçı döküm ile aynı performansı çok daha hızlı ve pratik bir şekilde verdiği görülmüştür.

Malzeme ve mekanik bazlı mühendislik uygulamalarında, özellikle artan rekabetçi sektörel yarış durumu da göz önüne alındığında, yüksek performansı düşük ağırlık ile elde etmek gibi bir süreç öne çıkmaktadır. Bu durum 3B yazıcılarla üretilen dental implantlarda da kendisini göstermektedir ve titanyum alaşımları bu konunun merkezinde bulunmaktadır. Doku uyumunun sağlanması için yapılan gözenekli yapılardan standart dolgulu yapılara kadar bir çok dental implant örneği titanyum alaşımları üzerinde uygulama odaklı optimize edilmeye çalışılmaktadır. Ghassemieh ve ark. binder jetting metodu ile ürettikleri titanyum implantların son sinterleme işlemleri üzerinde çalışmışlar ve merkezi gözeneklilik ile yüzeydeki gözeneklilik değerinin sinter sıcaklığı ile azalmaya başladığını göstermişlerdir (Gagg vd., 2013). Kim ve ark. DMLS yöntemini kullanarak Ti-6Al-4V tozlarından oluşan bir dental implant ürün grubu üretmişler ve laser spacing arttıkça mikroyapıda gözlemlene gözenek sayısının arttığını vurgulamışlardır (Kim vd., 2020). Ji ve ark. SLM ile üretilen boşluklu kemik benzeri dental titanyumların 500 µm gözenek boyutlu ve 48%-84% arasında değişen oranda da gözenekli olduklarını belirtmişlerdir (Ji vd., 2018). Tsai ve ark. tahribatsız muayene yöntemlerinin zirkonya seramiklerden SLA ile üretilmiş takma diş örnekleri üzerinde kullanılabileceğini (Şekil 19) ve olası iç yapı kusurlarının ultrasonik muayene ile tespit edilebileceğini öne sürmüşlerdir (Tsai vd., 2020).



Şekil 19. Protezlere yönelik zirkonya baskısı. SLA baskılı numuneler (a), kusurların bilgisayarlı tomografi görüntüleri (b), kusurları olmayan numunelerin ultrasonik sonuçları (c) ve (d) (Tsai vd., 2020).

1.5. Eklemeli İmalat ile Üretilen Komponentlerde Mekanik Davranışlar

Eklemeli imalatın fotopolimerizasyon temelli tekniğiyle üretilen numuneler üzerinde mekanik özellikler farklı proje grupları tarafından araştırılmış ve bazı deneysel bulgular ortaya konmuştur. Bu noktada genellikle, çekme dayanımı, uzama kabiliyeti, elastik modül, basma mukavemeti ve eğilme dayanımı gibi hedef özelliklere odaklanılmıştır.

Raporlanan bazı çalışmalara bakıldığında, Li vd. basılı örneklerin çekme tipi mekanik davranışında malzeme baskı yöneliminin etkilerine odaklandı. Yazarlar, artan numune eğim açısına bağlı olarak çekme dayanımında azalma tespit edip bu durumu mekanik anizotropi ile izah etmişlerdir (Li vd., 2020). Aktitiz vd. yaptıkları çalışmada, SLA cihazı kullanarak epoksi parçalar basılmış, ikincil kürleme süresinin polimer yapıların mekanik ve termal özelliklerine etkisini incelemek için farklı sürelerde UV ikincil kürleme işlemi uygulamıştır (Aktitiz vd., 2020). Bulgulara göre, artan kürleme süresi ile beraber epoksi numunelerin darbe dayanımları düşüş eğilimine girmiştir. Hossain vd. DLP işlemiyle üretilmiş elastomerik poliüretan malzemenin gerinime bağlı davranışlarını incelemiş ve düşük gerinim oranlarında viskoelastik yapısal davranışa odaklanmıştır (Hossain vd. 2020). Miedzinska vd. SLA ile imal edilen farklı reçine malzemelerinin gerinim hızı bağımlılığını incelemek için yarı statik ve dinamik sıkıştırma testlerini gerçekleştirmiştir (Miedzinska vd., 2020). Araştırmacılar, artan deformasyon hızına bağlı olarak polimer numunelerin gevrekleşip küçük parçalar halinde kırılma eğilimin arttığının altını çizmişlerdir. Reyes vd.

dental uygulamalara özgü biyouyumlu polimerik numuneleri farklı eklemeli imalat teknikleri ile üretti ve SLA orjinli numunelerin tüm baskı yönlerinde daha yüksek flexural modulus değerine ulaştığını belirtti (Garcia vd., 2022). Topsakal vd. biyouymu dental reçinelerin yaşlandırma özelliklerinin mekanik özelliklere etkileri üzerine çalıştı (Topsakal vd., 2023). Araştırmacılar, DLP ve SLA yazıcıların ürettiği parçaların yaşlandırma işleminden sonra bile fizyolojik kuvvetlere dayanabilecek mekanik karakterde olduğunu belirttiler. Simeon vd. DLP ve SLA ile üretilen ısırma plaklarının eğilme ve aşınma davranışlarını karşılaştırdı ve elde edilen verilere göre, DLP ile üretilen numunelerin mukavemeti ve aşınma dayanımı sonuçları baskı yönüne bağlı olmaksızın SLA ya göre daha az olduğunu göstermiştir (Simeon vd., 2024).

1.6. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri

Son yıllarda kapsamlı çalışmalara yönelik iş birliği isteğinin artması ve tecrübelerin birleştirilmesinin öneminin anlaşılmasıyla birlikte, mühendislik ve diş hekimliği alanları arasındaki disiplinler arası çalışmalar, özellikle mekanik ortodonti analizleri ve hastaya özel 3B baskı uygulamaları ile her geçen gün artmaktadır. Bu anlamda fotopolimerizasyon tabanlı 3B baskı, diş hekimleri ve mühendisler için kaliteli modeller, cerrahi kılavuzlar, pratik protezler ve yüksek performanslı geçici dişler yapmak için oldukça faydalı bir araçtır. Gerçek hizmet koşullarında, korozyona dayanıklılık, mekanik mukavemet ve aşınma direnci, herhangi bir sağlık riski olmaksızın yapay bir diş protezinin karşılaması gereken en önemli özelliklerdir. Burada korozyonun büyük ölçüde seçici lazer ergitme veya elektron ışınlı ergitme gibi metal Eİ teknolojileri ile üretilen metalik implantlarda meydana gelen bir sorun olduğu bilinmektedir. Öte yandan mekanik özellikler diş hekimliği için bir diğer önemli konudur ve modellerde, protezlerde ve geçici dişlerde kullanılan diş polimerleri genellikle stereolitografi (SLA) ve doğrudan ışıkla işleme (DLP) gibi vat-polimerizasyon yöntemleriyle üretilir. Bu bağlamda Farkas ve ark. diş örnekleri üretmek için DLP tekniğini kullanmış ve yatay olarak oluşturulmuş örneklerin dikey örneklerden daha iyi gerilme özellikleri sergilediğini belirtmişlerdir (Farkas vd., 2023). Bayarsaikhan ve ark. sertleştirme sonrası sıcaklıkların SLA baskılı diş reçinelerinin bükülme tepkisi üzerindeki etkisini analiz etmişler ve artan sertleştirme sıcaklığıyla sertlik, bükülme modülü ve biyouyumluluk değerlerinin arttığını bildirmişlerdir (Bayarsaikhan vd., 2021). Milovanovic ve ark. diş plakları için SLA baskı sonrası zaman etkisini incelemişler ve numunelerin basınç akma mukavemeti ve bükülme mukavemeti değerlerinin sırasıyla beş ve yedi gün sonra en yüksek seviyelere ulaştığını ortaya çıkarmışlardır (Milovanovic vd., 2021). Alshamrani ve ark. baskı

tabakası kalınlığının dental reçinenin sertliği üzerinde etkili bir parametre olduğunu ancak dalgalanan deney sonuçları nedeniyle güçlü bir optimizasyon yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu değerli katkıların yanı sıra kron ve protezlerin mekanik tepkileri, cerrahi kılavuzlarda kırık incelemeleri ve diş implantlarının weibull dağılımı gibi cerrahi uygulamaya dayalı analizler de farklı araştırma ekipleri tarafından yürütülmüştür (Alshamrani vd., 2022).

Eİ yoluyla üretilen fotopolimerize diş reçinelerinin aşınma ve sürtünme özellikleri gerçek ortodonti ve implant uygulamalarında oldukça kritik olmasına rağmen, bu alandaki araştırmaların sayısı mekanik çalışmalara göre nispeten daha az sayılabilir. Ancak son zamanlarda araştırmacıların yoğun çabalarıyla bu eğilim değişmeye başladı. Örneğin, Gad ve ark. aşınma özelliklerini araştırmak için ASIGA, Formlabs ve NextDent dental reçinelerini karşılaştırdı ve en düşük (22.54 μm) ve en yüksek (37.55 μm) hacim kaybının Formlabs ve NextDent reçinelerinde gözlemlendiğini gösterdi (Gad vd., 2023). Pham ve ark. SLA baskılı protez dişlerin zirkonya aşındırıcıya karşı 0.058 mm aşınma derinliğine sahip ticari olarak satılan modellere göre 0.016 mm aşınma derinliği ile daha iyi deformasyon dayanımı sergilediğini ileri sürmüşlerdir (Pham vd., 2021). Park ve ark. PMMA reçinesinin aşınma tepkisi üzerine karşı aşındırıcı parçasının tipine odaklanmış ve sürtünme testinin dinamik doğası sonucunda metal aşındırıcıda çatlaklı yüzeyler görüldüğünü, zirkonya aşındırıcıda ise daha pürüzsüz yüzeyler tespit edildiğini kaydetmiştir (Park vd., 2018). Simeon ve ark. dental baskı üzerine uygulamalı istatistiksel yaklaşımlar yürütmüşler ve aşınma özelliklerinin en çok reçine malzeme türünden etkilendiğini ortaya koymuşlardır (Simeon vd., 2024). 3B baskının umut verici üretim potansiyelinin altını çizmek için Jung-Ju ve ark. SLA baskılı geçici diş numunelerinin, öğütülmüş ve geleneksel olarak kendi kendine sertleşen numunelerle kontrol edildiklerinde yeterli aşınma performansı sergilediklerini belirtti (Ahn vd., 2019). Mayer ve ark. geçici kron reçinesi için sonradan temizlemenin etkisini ortaya çıkardılar ve izopropanol temizlemenin kırılma mukavemetini azalttığını ancak iki gövdeli aşınma dayanıklılığını değiştirmedeğini öne sürdüler (Mayer vd., 2021).

Daha önceki bilimsel arka plan analizlerine ve mevcut teknik raporlara bakıldığında, eklemeli imalat ile üretilmiş dental reçinelerin tribolojik performansının keşfedilmesi ve hasar mekanizmasını detaylı bir şekilde tespit edilmesi için hala uzun bir yol olduğu söylenebilir. Ayrıca, Eİ süreci boyunca tayin edilen baskı parametreleri ile kullanılan dental reçinelerin kimyasal konfigürasyonu arasında oluşabilecek sinerjik ilişkinin tespit edilmesi

pratik uygulamalara giden yolda elzemdir. Bu noktada, bu tez çalışması ile imalat süreç değişkenleri ile hedef ürünün, kimyasal kompozisyonu ve aşınma test kuvvetinin arasındaki birleşik etkileşimi literatürde ilk kez ele alındığı bilinmektedir. Buna bağlı olarak, SLA yazdırma değişkenleri (UV' ye maruz kalma süresi ve bina yönelimi) ve sürtünme testi kuvveti seviyeleri özel bir geçici diş reçinesi için literatür göz önüne alınarak çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında hacim kaybı, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülük ve sertlik sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, deformasyonun doğasının anlaşılması ve hasar mekanizmasının tespiti için mikro ölçekli tetkiklerde yapılmıştır. Elde edilen deneysel verilerle, bulguların Eİ ve diş hekimliği alanlarında gelecekteki çalışmalara geniş bir bakış açısı getirebileceği ve pratik uygulamalarda hasta sağlığına olumlu katkı sunabileceği düşünülmektedir.



İKİNCİ BÖLÜM

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Dental Reçine Malzemesi

Reçine polimeri olarak Dokuz Kimya (Aydın, Türkiye) tarafından sağlanan, geçici diş uygulamalarına yönelik özel bir bileşim olan ve Şekil 20’ de görseli paylaşılan Alias Dental Temp C&B karışımı kullanılmıştır.



Şekil 20. Kullanılan reçine, Alias Dental Temp C&B

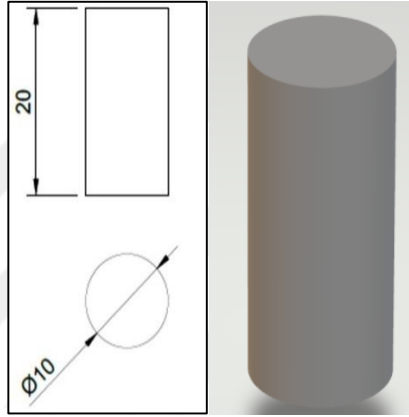
Bu reçine restoratif tedaviler, kısa süreli kron/köprü uygulamaları ve protezlerin hızlı prototiplenmesi gibi farklı amaçlarla kullanılabilir. Ayrıca biyouyumluluk, kolay temizlenme imkânı, renk çeşitliliği, üretilebilirlik ve kokusuz yapı gibi diğer avantajlı özellikler de bu reçine tipinin seçilmesinin ikincil nedenleridir. İlgili teknik standartlara uyan tedarikçinin sağladığı bilgilere göre, denenen reçinenin hem 3B baskı sürecini hem de nihai ürünün performansını etkileyen bazı mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 1' de görülebilir.

Tablo 1. Kullanılan diş reçinesinin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri

Özellikler	Test Standardı	Sonuç
Kopma direnci (MPa)	ISO 178	61
Elastik modül (GPa)	ISO 178	2.52
Kopma uzaması (%)	ISO 178	4
HDT (°C)	ISO 75-1	105
Viskozite (25°C’ de cP)	DIN 53019-1	500

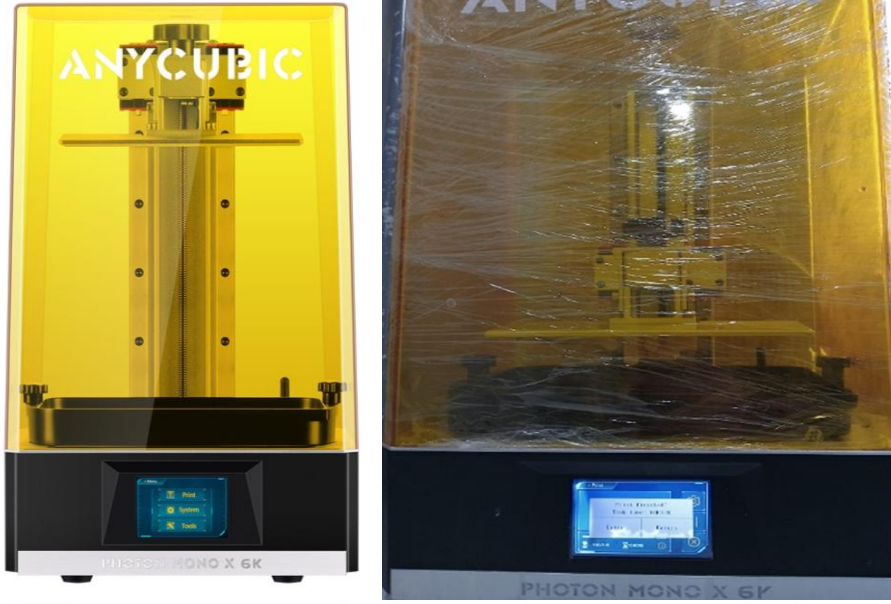
2.2 Fotopolimerizasyon Esaslı 3B Baskı Çalışmaları

Baskı aşamasından önce bilgisayar destekli tasarım yazılımı olan SolidWorks programında, Şekil 21’ de paylaşılan 10mm çapında ve 20mm yüksekliğinde tribolojik test numuneleri tasarlandı.



Şekil 21. Test numune tasarımı

Daha sonra ilgili 3B tasarım dosyası, Lychee Slicer Pro'nun özel bir yazılımı aracılığıyla uygun G kodlarını oluşturmak için 'STL' dosyasına dönüştürüldü. Oluşturulan dosya, katman katman üretimin başlatılması için 3B yazıcı makinesine iletildi. Diş numunelerini üretmek için UV bazlı polimerizasyon işlemi yoluyla SLA tarzı üretimle çalışan Şekil 22’ de paylaşılan, Anycubic Photon Mono X 6K model yazıcı kullanıldı. Yeterli baskı alanı (245×197×122 mm) ve çoklu numune oluşturulabilmesi sayesinde üretim için bu kapalı kabin yazıcı seçildi.

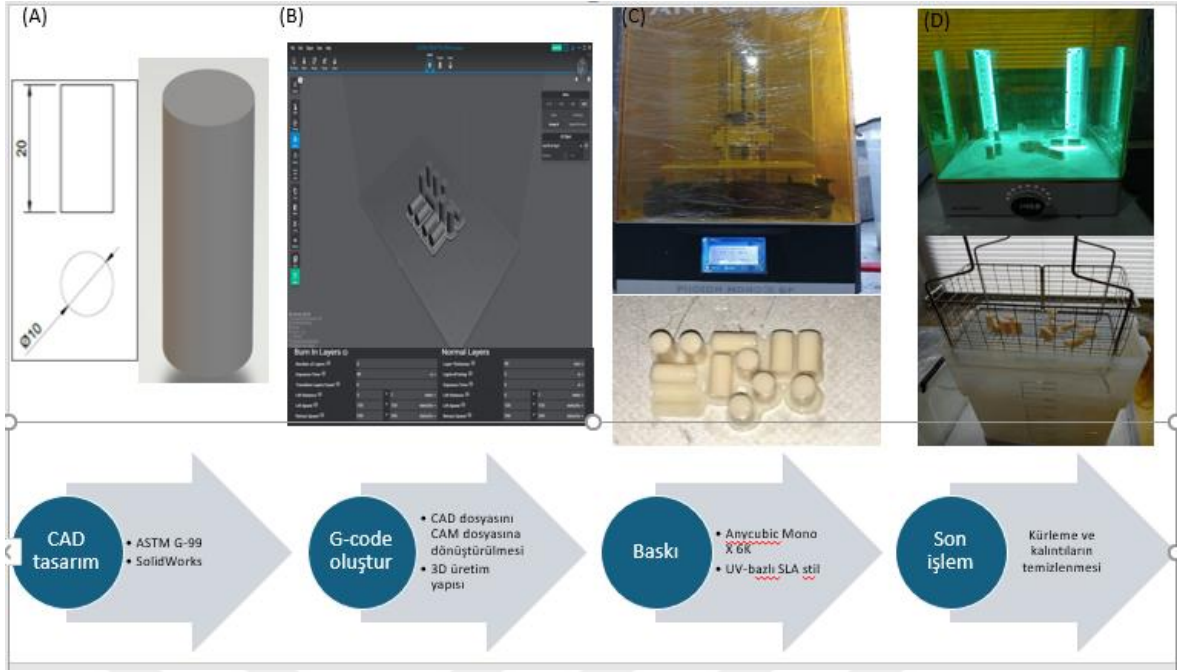


Şekil 22. Kullanılan 3B yazıcı

Üretim aşamasında değişen parametreler olarak bina yönü (dikey ve yatay) ve UV maruz kalma süresi (4s, 6s, 8s ve 10 s) seçilmiş olup diğer parametreler sabit tutulmuştur. Tablo 2, fotopolimerizasyon sırasındaki ana işlem parametrelerini gösterir ve ayrıntılı üretim süreci Şekil 23' de paylaşılmıştır.

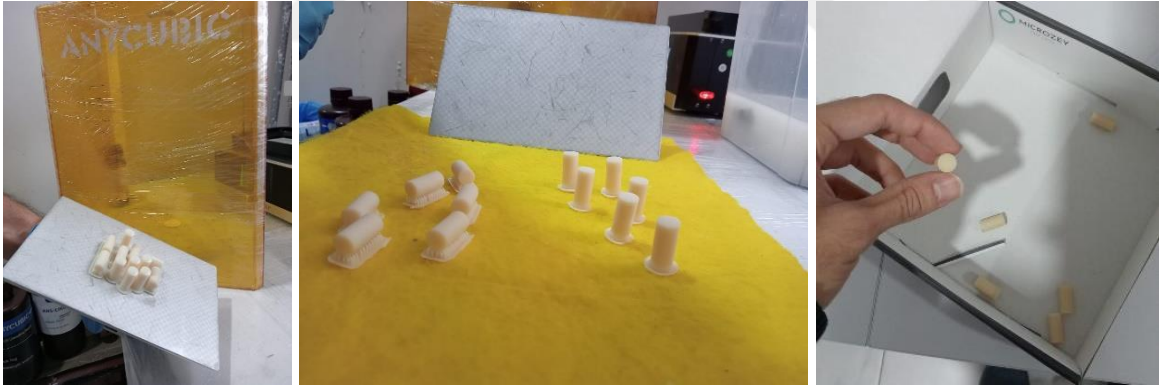
Tablo 2. SLA işlem parametreleri

Değişkenler	Seviye
Katman kalınlığı (μm)	50
Işık süresi (s)	3
Baskı yönü	Dikey, Yatay
Pozlama süresi (s)	4, 6, 8, 10
Işık hızı (mm/m)	120
Geri çekme hızı (mm/m)	240
Kaldırma mesafesi (mm)	5 - 7
UV dalga boyu (nm)	405
Işık geçirgenliği (%)	6



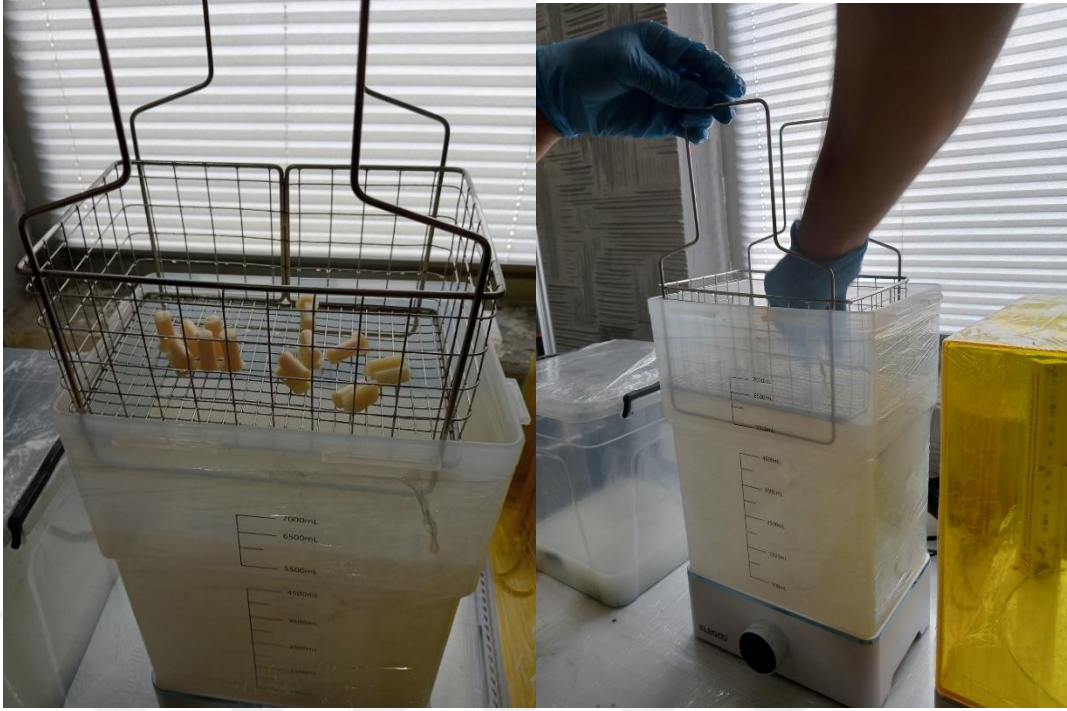
Şekil 23. Diş numuneleri için üretim akış şeması

Her baskı işleminden sonra, üretilen numuneler Şekil 24’ te paylaşıldığı gibi taban platformundan bir spatula ile ayrılmıştır. Tüm numuneler belirgin leke, çatlak, oluk ve deformasyon çizgileri olup olmadığının tespiti için makro inceleme yapılmıştır.



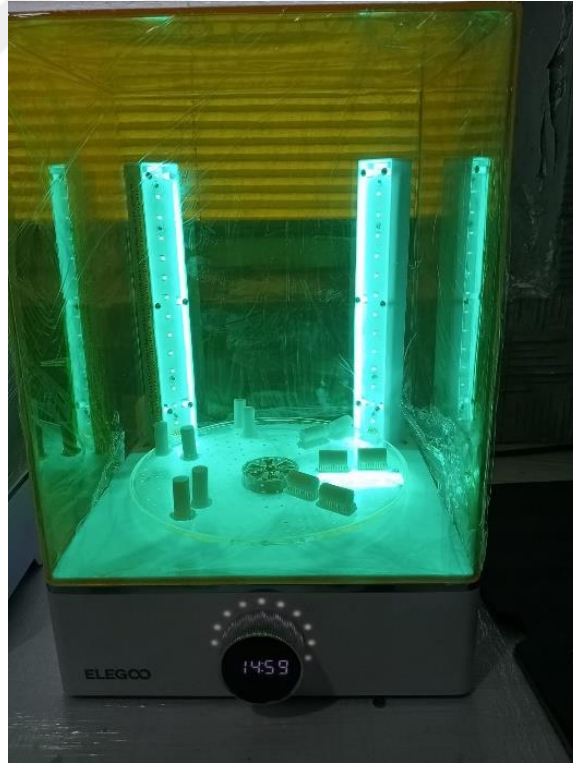
Şekil 24. Basılan numunelerin platformundan ayrılması

Daha sonra ilk kalite kontrolünden geçenler mikro ölçekte istenmeyen kalıntıları ortadan kaldırmak amacıyla Şekil 25’ te paylaşıldığı gibi izopropil alkol solüsyonu ile on dakika süreyle temizlenmiştir.



Şekil 25. Test numunelerinin solisyon ile temizlenme süreci

Daha sonra Elegoo Mercury XS kürleme makinesinde on dakika süreyle UV kürleme işlemi gerçekleştirilmiştir Şekil 26.



Şekil 26. Test numunelerinin kürlenme süreci

2.3 Uygulamalı Test Prosedürleri

SLA baskı süreci sonrası kalite kontrolüne yönelik görsel makro incelemelerin ardından boyutsal değerlendirmeler detaylı olarak parça analizleri yapıldı. Numunelerin çap ve yükseklik değerlerinin kaydedilmesi için Şekil 27, kumpas (Mitutoyo Model 150×0,01 mm) ile boyut ölçümleri yapıldı. Ayrıca Şekil 28 yoğunluk hesabı için numunelerin kütle değerleri hassas terazi (Radwag AS 220) ile ölçülmüştür.

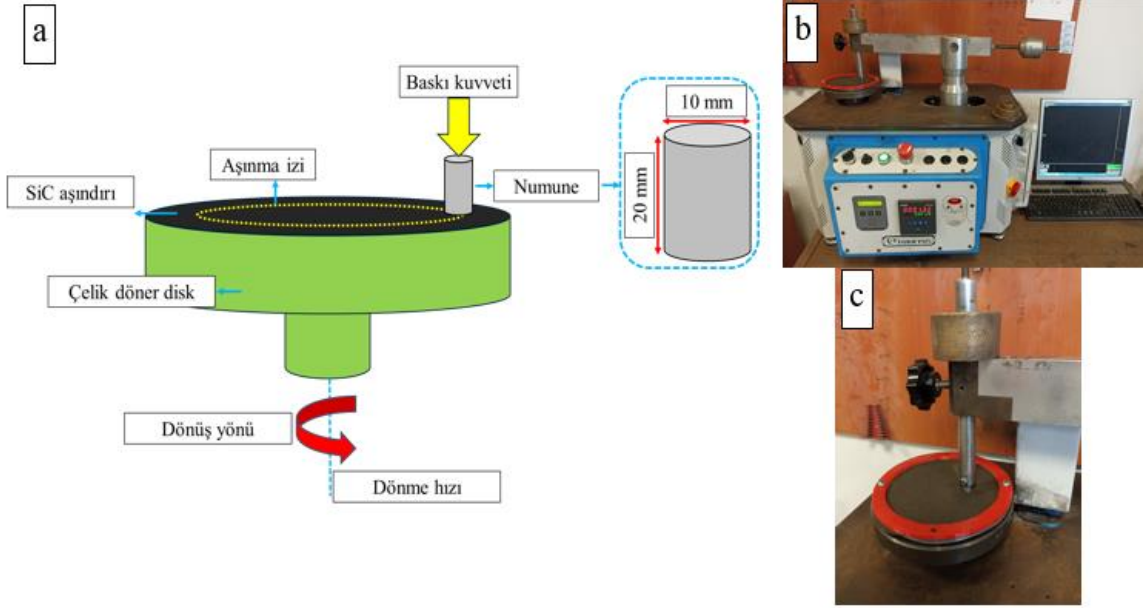


Şekil 27. Test numunesi boyut ölçümü



Şekil 28. Test numuneleri ağırlık ölçümü

Sertlik testleri Shore D modunda, durometre kullanılarak gerçekleştirildi ve ASTM D2240 standardına göre her numune için tekrarlanan ölçümlerin ortalaması dikkate alındı. Tribolojik değerlendirmelerde kuru kayar pin-on-disk test cihazı (Turkyus Podwt aşınma test cihazı) kullanılmıştır ve ASTM G99 standardı dikkate alınmıştır. Üretilen numuneleri aşındırmak için karşı yüzey olarak kendinden yapışkanlı SiC kağıtları (320 kum boyutunda) seçilmiştir. Bir önceki deformasyonun etkisini engellemek için her test için yeni bir zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Diğer taraftan artan test kuvvetlerinin ana hasar mekanizması üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla üç farklı kuvvet seviyesi (5, 10 ve 15 N) seçilmiştir. Ek olarak aşındırma testi sürecinin gerçek görünümü Şekil 29' da paylaşılmaktadır.



Şekil 29. Aşındırma testi kurulumunun şematik görünümü (a), ve cihazın gerçek genel görünüm (b) aşındırıcı alanının görünümü (c)

Aşınma testleri 2 m/s hızda yapılmış ve Esit Data Logger V1.1.8 yazılımı ile sürtünme kuvveti seviyeleri tespit edilmiştir. Daha sonra kaydedilen sürtünme kuvvetlerine bağlı olarak numunelerin sürtünme katsayısı sonuçları bulunmuştur. Aşınma analizlerinde hacim kaybı ilkesi benimsendiği için her numunenin kütle değişim sonuçları her testten önce ve sonra izlendi. Bu noktada sırasıyla Denklem 1 ve Denklem 2' ye göre sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerleri hesaplanmıştır. Bu denklemlerde CoF, F, N, VL, mL ve ρ sırasıyla sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, normal kuvvet, hacim kaybı, kütle kaybı ve yoğunluk değerlerini temsil etmektedir. Bu çalışmaların yanı sıra, aşınmış numunelerin deformasyon özellikleri üzerindeki olası etkisinden dolayı numune yüzeylerinde yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi de yapılmıştır. Bu amaçla yüzey profilometre düzeneği (Mahr MarSurf PS1) kullanılmış ve tekrarlanan sonuçların ortalama değeri belirlenmiştir.

$$CoF = \frac{F}{N} \text{ (Denklem1)}$$

$$V_L = \frac{m_L}{\rho} \text{ (Denklem 2)}$$

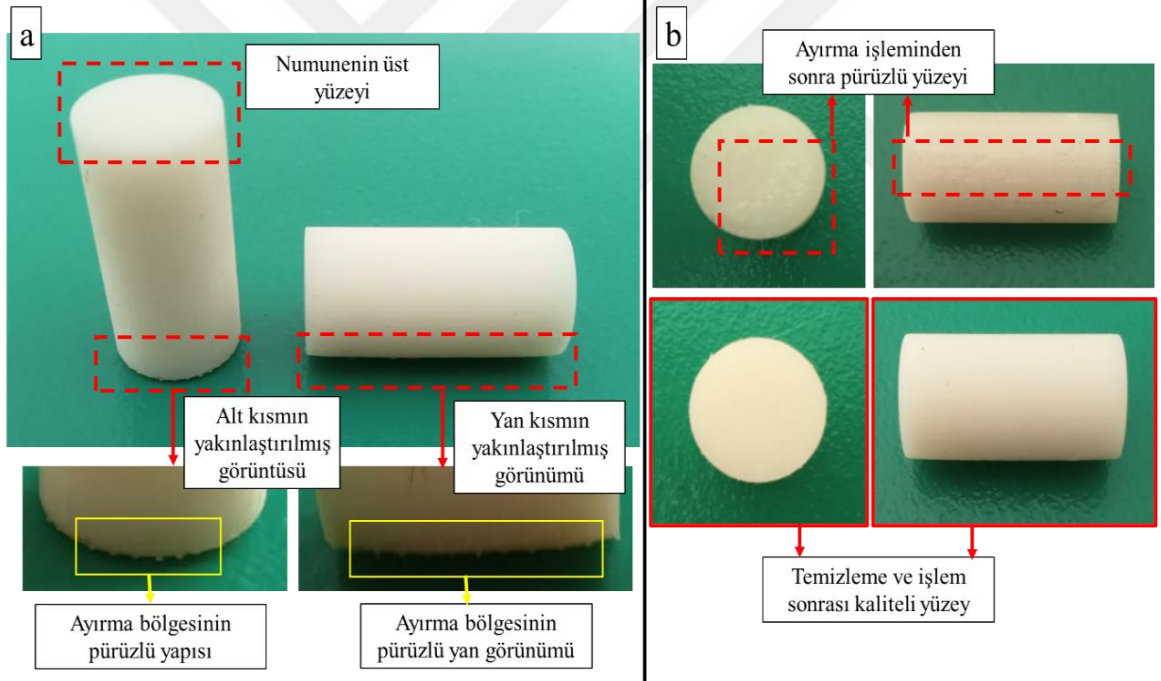
Test edilen numunelerin aşınma mekanizmalarını incelemek için ek mikroskopik incelemeler yapılmıştır. Bu nedenle taramalı elektron mikroskobu (SEM) metodolojisi (Zeiss Gemini modeli) ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) kullanılmıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1 Görsel İncelemeler ve Boyutsal Analizler

Üretilen numunelerin taban katmanını gövdelerinden ayırdıktan sonra, parça kalitesinin hatalar açısından kontrol edilmesi amacıyla makro ölçekli görsel incelemeler yapılmıştır. Makro ölçekli değerlendirmelerde, numuneler üzerinde derin boşluklar, uzun yüzey çatlakları, hacim çarpıklığı, yüzey soyulması gibi belirgin kusurlara rastlanmamıştır. Taban katmanının ayrılmasından sonra, birleşim bölgesinde bazı pürüzlü kısımlar ve bölgeler fark edilmiştir. Kontrol edilen numunelerin her iki yüzeyleri arasında daha iyi paralellik olması amacıyla bu bölümler temizlenerek pürüzsüz hale getirilmiştir. Tüm bu çalışmalar ve üretilen numunelerin detayları Şekil 30' da görülmektedir.



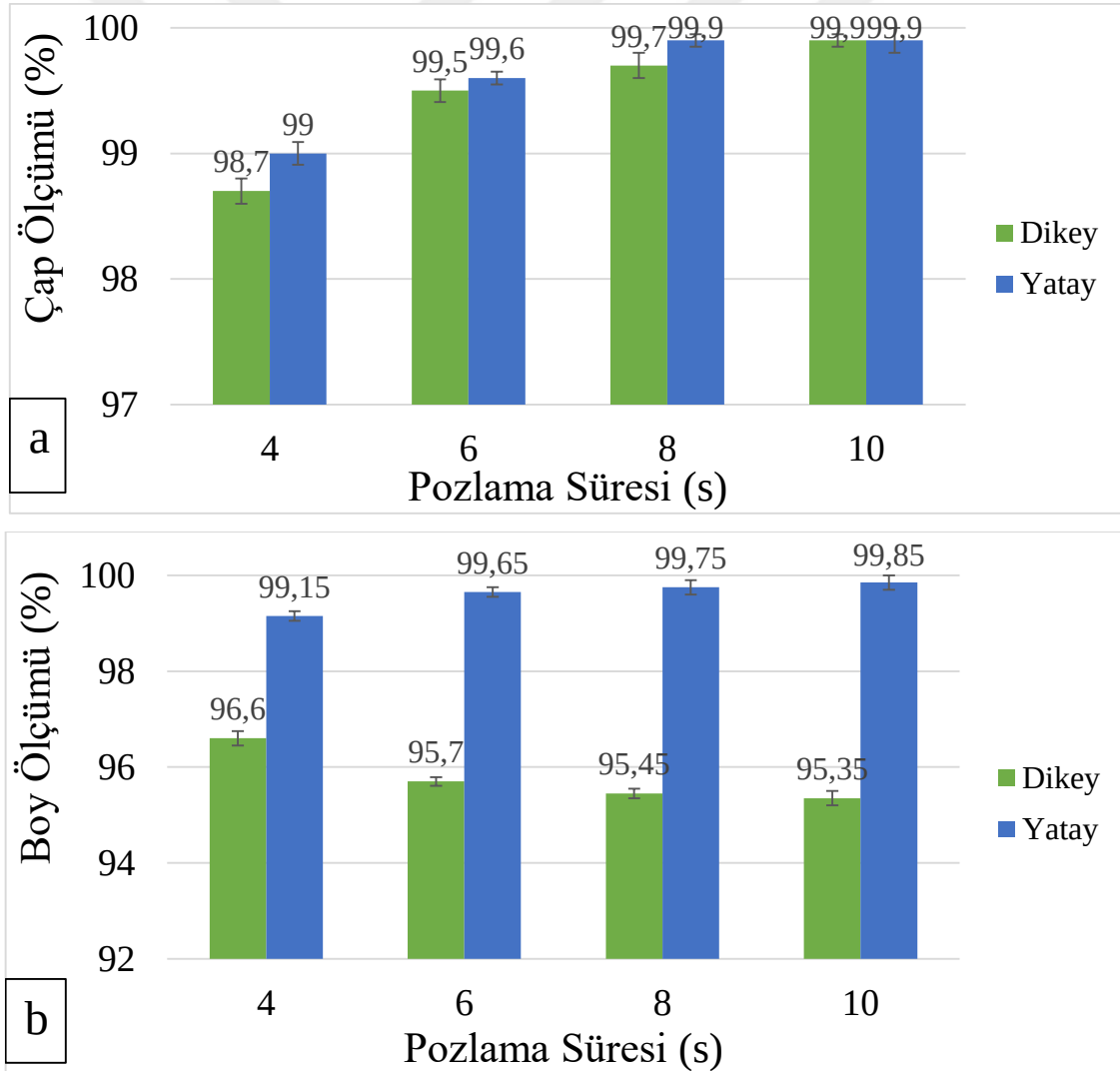
Şekil 30. Makro değerlendirmeler (a) ve basılan numunelerin son işleme bağlı olarak öncesi/sonrası görüntüleri (b)

Tablo 3, üretilen farklı pozlama sürelerindeki ve yatay/dikey olmak üzere toplamda 48 adet numunenin boyutsal özelliklerini kütle, hacim ve yoğunluk gibi bazı fiziksel özelliklerini yansıtmaktadır.

Tablo 3. SLA ile üretilen numunelerin fiziksel özellikleri

Numune No	Pozlama Süresi (s)	Yönü	Çap (mm)	Boy (mm)	Ağırlık (g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)
1	4	Yatay	9.93	19.80	1.86	1.53	1.21
2	4	Yatay	9.92	19.85	1.84	1.53	1.20
3	4	Yatay	9.88	19.80	1.86	1.52	1.22
4	4	Yatay	9.87	19.85	1.85	1.52	1.22
5	4	Yatay	9.92	19.85	1.85	1.53	1.21
6	4	Yatay	9.90	19.85	1.86	1.53	1.22
7	4	Dikey	9.87	20.70	1.92	1.58	1.21
8	4	Dikey	9.87	20.80	1.91	1.59	1.20
9	4	Dikey	9.87	20.75	1.91	1.59	1.20
10	4	Dikey	9.88	20.25	1.86	1.55	1.20
11	4	Dikey	9.90	20.75	1.92	1.60	1.20
12	4	Dikey	9.83	20.80	1.91	1.58	1.21
13	6	Yatay	9.93	19.95	1.88	1.55	1.22
14	6	Yatay	9.92	19.95	1.89	1.54	1.23
15	6	Yatay	10.00	19.95	1.90	1.57	1.21
16	6	Yatay	9.93	19.90	1.90	1.54	1.23
17	6	Yatay	9.98	19.90	1.88	1.56	1.21
18	6	Yatay	9.97	19.90	1.88	1.55	1.21
19	6	Dikey	9.95	20.90	1.95	1.63	1.20
20	6	Dikey	9.97	20.90	1.95	1.63	1.20
21	6	Dikey	9.93	20.90	1.94	1.62	1.20
22	6	Dikey	9.97	20.85	1.94	1.63	1.19
23	6	Dikey	9.95	20.75	1.95	1.61	1.21
24	6	Dikey	9.92	20.85	1.94	1.61	1.20
25	8	Yatay	10.00	19.95	1.91	1.57	1.22
26	8	Yatay	10.00	19.95	1.91	1.57	1.22
27	8	Yatay	9.98	19.95	1.92	1.56	1.23
28	8	Yatay	9.97	19.95	1.91	1.56	1.23
29	8	Yatay	9.98	19.95	1.91	1.56	1.22
30	8	Yatay	9.98	19.95	1.92	1.56	1.23
31	8	Dikey	9.98	20.80	1.96	1.63	1.20
32	8	Dikey	9.98	20.95	1.97	1.64	1.20
33	8	Dikey	9.97	20.90	1.96	1.63	1.20
34	8	Dikey	9.95	20.90	1.96	1.63	1.21
35	8	Dikey	9.97	20.95	1.97	1.63	1.21
36	8	Dikey	9.95	20.95	1.96	1.63	1.20
37	10	Yatay	10.00	19.95	1.91	1.57	1.22
38	10	Yatay	10.00	20.00	1.93	1.57	1.23
39	10	Yatay	9.98	19.95	1.92	1.56	1.23
40	10	Yatay	9.98	19.95	1.93	1.56	1.24
41	10	Yatay	9.98	19.95	1.92	1.56	1.23
42	10	Yatay	9.98	20.00	1.92	1.57	1.23
43	10	Dikey	10.00	20.80	1.98	1.63	1.21
44	10	Dikey	10.00	20.95	1.98	1.65	1.20
45	10	Dikey	10.00	20.95	1.98	1.65	1.20
46	10	Dikey	10.00	20.95	1.98	1.65	1.20
47	10	Dikey	9.95	20.95	1.97	1.63	1.21
48	10	Dikey	9.97	20.95	1.98	1.63	1.21

Ayrıca çap ve yükseklikteki boyutsal doğruluk sonuçları Şekil 31' de görülmektedir. Çap yönüne ilişkin geometrik analizlerden pozlama süresi ve yatay baskının boyutsal doğruluk değerlerine olumlu etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum, polimerize faz ile daha fazla üretim boşluğunun doldurulmasını sağlayan, pozlama süresinin artmasıyla birlikte detay oluşturma yeteneğinin artması anlamına gelmektedir. %98.7 ile en düşük ortalama doğruluk, 4 saniyelik en düşük pozlama süresine tabi tutulan dikey örnekte bulunmuştur. Buna karşılık, en yüksek ortalama doğruluk %99.9 ile 10 saniyelik pozlama süresiyle basılan numunelerde görülmüştür. Boyutsal doğruluğuna gelince, yatay üretim yönünün de benzer bir doğruluk eğilimi gözlenmiştir. Öte yandan dikey numuneler, daha düşük pozlama sürelerinde biraz daha iyi doğruluk performansı sergilemiştir. Genel olarak çap için belirtilen sonuçlara benzer şekilde, yükseklik açısından en iyi ürün kalitesine (%99.85) 10 saniye maruz kalma süresiyle yatay tarzda basılan numunelerde olduğu görülmüştür.



Şekil 31. Dikey ve yatay olarak oluşturulan numunelerin çap (a) ve boy (b) cinsinden boyutsal doğruluk sonuçları

İyi bilinen erimiş filament üretimi (FFF) gibi, diğer alternatif üretim stilleri ile karşılaştırıldığında, SLA yöntemi parça hakkında daha fazla ayrıntı sunar ve elde edilen sonuçların doğruluğu iki yöntem için karşılaştırıldığında, tespit edilen hata oranlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. (Alsoufi ve Elsayed, 2018; Bolat ve Ergene, 2022). Bu durum, polimerizasyon ışığının hassas nokta ilerlemesinin ve baskılı polimer malzemelerin termal genleşme özelliklerinden büyük ölçüde etkilenen katılma sürecinin ortadan kaldırılmasının birleşik etkisinden kaynaklanmaktadır. Ek olarak, bu çalışmada önerilen SLA yöntemiyle elde edilen doğruluk seviyeleri, hastaların gerçek estetik kaygıları için umut verici bir potansiyel olduğu ve ağız geometrisinde daha sağlıklı bir oklüzyona yardımcı olacağı düşünülmektedir.

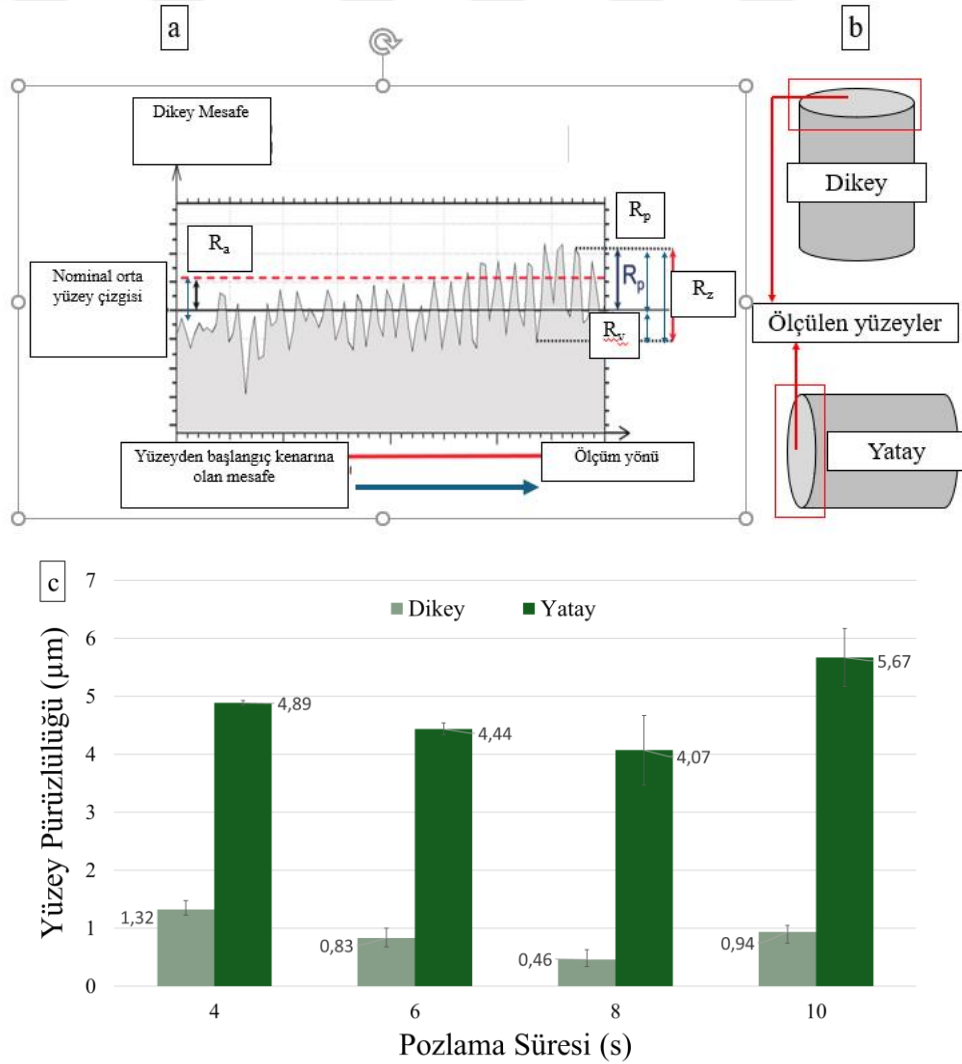
Basılan tüm numunelerin yoğunluk değerleri proses değişkenlerine bağlı olarak dalgalanma eğilimi göstermiş ve 1.19 g/cm³ ile 1.24 g/cm³ değerleri arasında değişmiştir (Ortalama 1.21 g/cm³). Diş hekimliği uygulamalarının genel ihtiyaçları ve hastaların konforu göz önüne alındığında, literatür çalışmaları ışığında yoğunluk bulguları orta-düşük kategori olarak değerlendirilebilir (Li vd., 2019). Tam bu noktada, parça kalite analizlerine ve doğruluk değerlendirmelerine kapsamlı bir şekilde bakıldığında, uygulanan UV prensibi SLA teknolojisinin, performans odaklı yüksek kaliteli geçici diş malzemelerinin hızlı üretimi için umut verici bir potansiyele sahip olduğunu söylemek mümkündür.

3.2 Yüzey Pürüzlülük Değerlendirmeleri

Test edilen numunelerin başlangıç yüzey morfolojisi ve ortalama başlangıç pürüzlülük seviyeleri, 3B parçaların aşınma ve sürtünme tepkileri için en etkili özelliklerden bazılarıdır çünkü başlangıç numunelerinin yüzey kalitesi, aşınmış numunenin temas yüzeylerindeki deformasyon özelliklerini belirleyebilir. Aşağıda Şekil 32 a ve b' de gösterilen örnek aşınma, yüzey pürüzlülüğü ölçüm stratejisini ve ilgili numune yüzeylerini ayrıntılı olarak göstermektedir. Bu çalışmada doğrusal sapma tekniği kullanılarak tekrarlı pürüzlülük ölçümleri yapılmış ve ortalama pürüzlülük değeri kullanılmıştır. Şekil 32 a' da Ra, Rv, Rp ve Rz sırasıyla aritmetik ortalama pürüzlülüğü, maksimum tepe yüksekliğini, maksimum vadi derinliğini ve tepe ile vadi arasındaki doğrusal mesafeyi temsil eder.

Şekil 32 c, SLA ile üretilen numunelerin pozlamaya maruz kalma süresine ve üretim yönüne bağlı olarak (Ra) ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir. İlk bakışta dikey olarak üretilen numunelerin pozlama süresine bakılmaksızın yatay versiyonlarına göre daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu fark edilebilir. Hesaplamalara göre en düşük

ortalama pürüzlülük değeri $0.46 \mu\text{m}$ ile 8 saniye pozlama süresiyle basılan dikey numunede belirlenirken, en yüksek seviye $5.67 \mu\text{m}$ ile 10 saniye pozlama süresiyle oluşturulan yatay numunelerde görülmüştür. Dikey olarak oluşturulan numuneler arasında en yüksek yüzey pürüzlülük değeri $1.32 \mu\text{m}$ olurken, bu sonuç 6s ve 8s pozlama süresine maruz kalan numunelerde $0.83 \mu\text{m}$ ve $0.92 \mu\text{m}$ olarak kaydedildi. Dikey olarak oluşturulmuş numunelerde avantajlı durumu gösteren bu durum, farklı reçine malzemeleri için diğer araştırmacılar tarafından da vurgulanmıştır (Al vd., 2022; Arayınd vd., 2020). Test edilen yüzeylerle doğrudan ışık teması ve UV ışığının bina katmanları üzerinde nispeten yoğun bir şekilde yayılması, dikey numunelerde yeterli kürlenmeyi sağlar, böylece daha iyi yüzey kalitesi elde edilir. Bununla birlikte, önceden tanımlanmış bir UV yolu ile yanal kesitler oluşturmak, yatay numuneler için birincil bir işlemdir. Pürüzlü yüzeylerin nedeni dairesel kesitlerin dolaylı kürlenmesi olabilir.

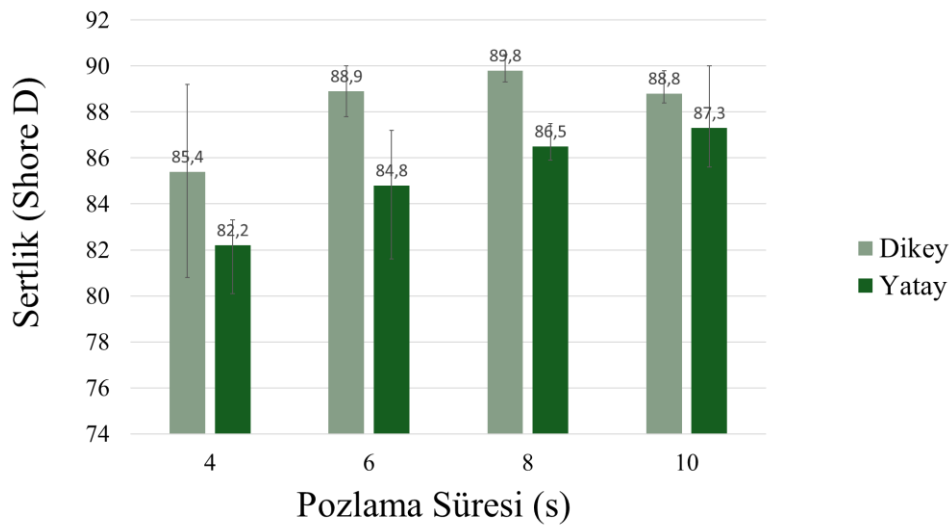


Şekil 32. Yüzey pürüzlülüğü stratejisinin (a) ve üretim yönüne bağlı olarak ölçülen yüzeyler (b) şematik görünümleri (c)

Pozlama süresinin etkisine gelince, 4 saniyeden 8 saniyeye kadar hem dikey hem de yatay olarak üretilenler için numunelerin ortalama pürüzlülük değerleri giderek azalmaktadır. Burada fazladan pozlama süreleri, aşırı sertleştirme kusurlarının bir sonucu olarak basılan numunelerin yüzey kalitesini bozabilir. Ayrıca SLA bazlı çalışmalarda denenen diğer reçine malzemeleri incelendiğinde elde edilen pürüzlülük aralıklarının benzer seviyelerde olduğu görülmektedir. Örneğin Dikova ve ark. Rapid Shape D30 ve Formlabs dental rezin materyalleri için 2.40 μm ve 2.97 μm pürüzlülük sonuçlarına ulaşıldığını bildirmişlerdir (Dikova vd., 2018). Shim ve ark. dikey olarak basılan numunelerin üstün yüzey kalitesine sahip olduğunu ve PMMA bazlı diş reçineleri için pürüzlülük aralığının 1.09 μm ile 0.39 μm arasında değiştiğini belirtmişlerdir (Shim vd., 2020). Singh ve ark. üretilen numune yüzeylerinde daha geniş bir pürüzlülük aralığı (0.90 μm – 7.10 μm) bulmuşlardır (Singh vd., 2023).

3.3 Sertlik Sonuçları

Test edilen numunenin sertliği, plastik deformasyon ve hasar özellikleri üzerindeki etkisi nedeniyle sürtünme ve aşınma tepkilerinde önemli rol oynayan diğer bir faktördür. Bu noktada tasarımcı açısından malzemenin genel kullanım amacı, çalışma koşullarında aşınmanın varlığı ve ilgili uygulamanın mekanik gereksinimleri, kullanılan bileşenin nihai sertliğinde belirleyici olmaktadır. Genellikle artan sertlik seviyeleri düşük kırılma tokluğuna ve yüksek rijitliğe neden olsa da sertliğin azalması yüksek süneklik ve düşük elastik modül ile sonuçlanır (Watters ve Bernhardt, 2018). Şekil 33' te üretilen numunelerin ölçülen sertlik sonuçları detaylı olarak incelenebilir.



Şekil 33. SLA baskılı numunelerin pozlama süresine ve üretim yönüne bağlı olarak sertlik sonuçları

Sonuçlara göre 8 saniye pozlama süresi ile basılan dikey oluşturulmuş numunelerde maksimum ortalama sertlik değerinin 89.8 Shore D olarak tespit edilmiştir. Minimum seviye olarak ise 4 saniye pozlama süresi ile yatay olarak oluşturulmuş numuneler için 81.3 Shore D değeri kaydedilmiştir. Ayrıca yatay numunelerde ortalama sertlik değeri artan pozlama süresine bağlı olarak 87.8 Shore D'ye yükseldiği görülmüştür. Öte yandan dikey numuneler için en düşük sertlik değeri 84.4 Shore D olarak bulunmuştur. Şekil 33' ten okunan grafiklerden sertlik ile maruz kalma süresi arasında büyük ölçekte olumlu bir ilişki olduğunu ifade etmek doğrudur. Belirlenen sertlik dikkate alındığında akrilik bazlı reçineler için literatürde bildirilen aralıklar (Yüzeyde 80.2 Shore D ve kütleme sonrasında maksimum 88.6 Shore D) (Yang ve Zhao, 2019). Heksan-akrilik reçineler (73-85 Shore D) (Trzaskowski vd.,2023) ve diş reçineleri için literatürde bildirilen belirlenmiş sertlik aralıkları dikkate alındığında (Keyortho için 81 Shore D, Nextdent için 84.9 Shore D ve Formlabs için 85 Shore D) (de Castro vd., 2022), bu araştırmalardaki sonuçlara göre orta-yüksek düzeyde sertlik aralıkları olarak referans alınabilir. Bu durum, ilave kütleme sonrası işleme gerek kalmadan SLA baskıdan hemen sonra diş reçineleri için daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılabilceğini göstermiştir. Geçici diş tedavisi gibi diş hekimliği uygulamalarına özel olarak önerilen SLA işlem parametrelerinin ve reçine tipinin eşleştirilmesi, gerçek zamanlı çözümler için oldukça umut vericidir.

Üretim yönünün etkisi değerlendirildiğinde dikey olarak üretilen örnekler sertlik açısından diğerlerine göre belirgin bir şekilde üstün olduğu görülmüştür. Dikey olarak üretilen örneklerin sertlik açısından daha üstün olduğu belirtilmiş, bunun nedeni ise dikey numunelerin yoğun bir katman düzenine sahip olması ve yüzeylerinin daha az mikro gözenek içermesidir. Bu özellikler, sertliğin artmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, yatay numunelerde ise test sırasında daha fazla pürüzlülük ve boşluklu bölgelerle karşılaşıldığı, bunun da sertlik düşüşüne neden olduğu ifade edilebilir. Bu tür yapılar, durometre ile yapılan sertlik testlerinde daha düşük performans göstermesine yol açabilir.

İdeal pozlama süresi, reçine türü, baskı boyutu ve geometrisi, pozlama yöntemi ve çevre koşullarına bağlı olarak değişir. Bu çalışmada, dikey numuneler üstün bir üretim kapasitesine sahiptir, bu durumda daha küçük üretim tabanlı mikro gözeneklilikle sonuçlanır. Ancak, dikey olarak üretilen numunelerde, 8 saniye sonrasında pozlama süresi aşırı pozlama nedeniyle moleküler bozulma riskini artırabilir. Dikey numuneler, yatay numunelere kıyasla daha iyi katman biriktirme eğilimindedir, bu da pozlamanın etkinliğini

artırır. Yatay numuneler ise düşük katman kabiliyetleri nedeniyle daha yüksek gözeneklilik gösterir ve bu durum sertliklerinde olumsuz bir etkiye yol açar."

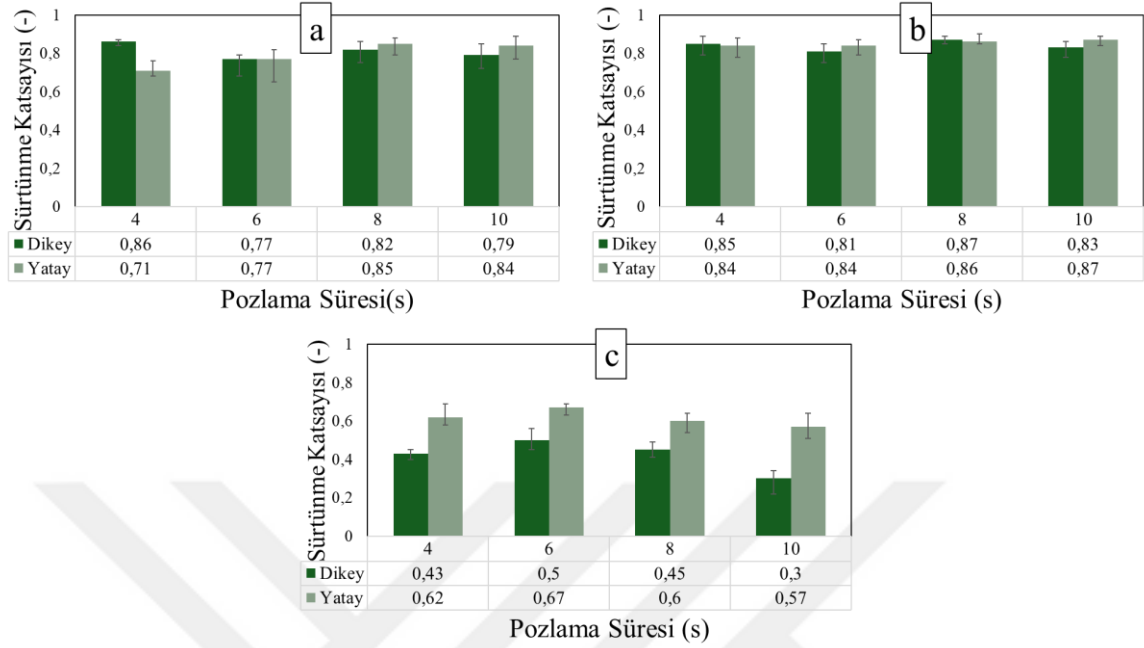
Eklemeli üretimle elde edilen numunelerin mekanik özelliklerinde, süreç parametreleri kritik bir rol oynamaktadır ve bu faktörlerin göz önünde bulundurulması önemlidir. Özellikle protezler, implantlar ve geçici dişler gibi spesifik diş hekimliği uygulamalarında bu durum geçerlidir. Literatür incelemelerine göre, baskı yönü, diş numunelerinin mekanik özellikleri üzerinde etkili bir faktör olarak değerlendirilebilir ve dikey olarak üretilen numuneler, basınç dayanımı açısından daha iyi performans göstermektedir (Slapnik vd., 202). Ayrıca, reçine türü de üretim aşamasındaki bir diğer önemli parametre olup, diş numunelerinin eğilme mukavemeti büyük ölçüde kullanılan reçineye bağlıdır (Braileanu vd., 2023). Katman kalınlığı ise mekanik performansı etkileyen bir diğer parametre olarak öne çıkmaktadır. Bazı araştırmalar, daha ince katmanların, daha uzun üretim sürelerine rağmen mekanik dayanıklılığı artırdığını belirtmiştir (Chockalingam vd., 2006).

Bu çalışmada, dikey yönde üretilen örnekler, mekanik tepkiler açısından avantajlıdır, özellikle sertlik açısından. Günlük kullanım için geçici dişlerde sertlik önemli bir faktör olarak kabul edilebilir, çünkü hastalar bu bileşenleri uzun süre kullanabilirler ve sert yiyecekleri tüketirler bile dayanıklılıklarını korurlar. Ayrıca, bu tür geçici dişler, çekirdek dişi, dış mekanik ve kimyasal etkilere karşı koruyarak kaplama tedavilerinin etkinliğini artırır. Öte yandan, yatay yönde üretilen örneklerde, Pozlama süresinin uzun tutulması nedeniyle daha yüksek sertlik sonuçları elde edilebileceği görülmektedir.

3.4 Sürtünme ve Aşınma Analizleri

Sürtünme katsayısı, aşınma deformasyonunun en önemli göstergelerinden biridir ve iki yüzeyin hareketine dayanan sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır. Temel olarak kayma aşınma testinin dinamik hasar durumundan etkilenir. Ortalama katsayı seviyeleri, test edilen yüzeylerin değişen temas koşullarıyla birlikte bir yağlayıcının veya başka herhangi bir arayüz katmanının varlığıyla birlikte değişir. Şekil 34' de test kuvvetlerine, üretim yönüne ve maruz kalma süresine bağlı olarak SLA baskılı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri gösterilmektedir. İlk bakışta en düşük pozlama süresi olan 4 saniyede bazı istisnalar olsa da yatay olarak basılan numunelerde ölçülen katsayı seviyelerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu gözlem, en yüksek 15 N yükte test edilen numuneler için daha belirgindir. Bu çalışmada, yatay yazdırılan numuneler, Şekil 32 c' de gösterildiği gibi yüksek pürüzlülük

değerleri, düşük yüzey kalitesi ile sonuçlandığını göstermektedir. Bu durum, numune ile SiC arasındaki çoklu temas noktalarından kaynaklanmaktadır.



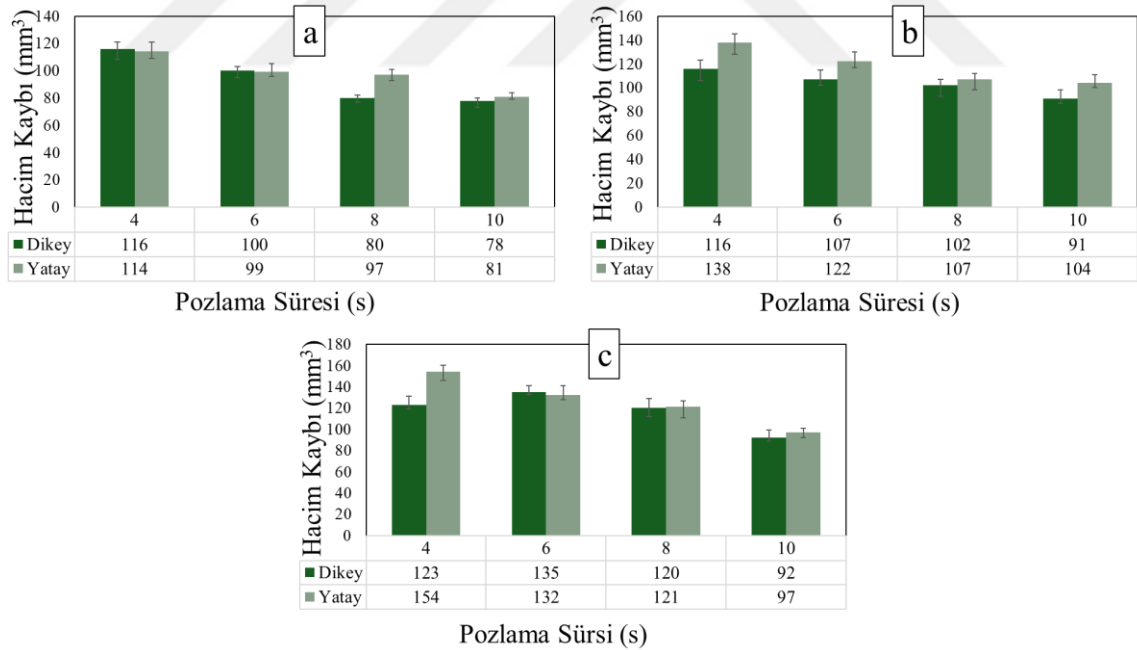
Şekil 34. Değişken test yüklerine ve üretim yönüne bağlı olarak SLA baskılı numunelerin sürtünme katsayı sonuçları; 5N (a), 10N (b) ve 15N (c)

Kayma yükü seviyeleri 15 N' a çıktıkça hesaplanan sürtünme katsayısı değerleri tüm maruz kalma süreleri ve bina yönleri için azalma eğilimi göstermektedir. Tespit edilen eğilim dikkate alındığında ana sebep olarak kayma testinin dalgalı katsayı değerlerine neden olan dinamik özelliği ve artan kayma mesafesi sonrasında ortaya çıkan aşınmanın değişen deformasyon mekanizmasının ön plana çıktığı ileri sürülebilir. Elde edilen sonuçlardan en düşük sürtünme katsayısı değeri olan 0.3 ile 15 N test kuvvetinde 10 saniye pozlama süresine sahip dikey olarak basılan numuneye ait olduğu tespit edilmiştir. Ancak en yüksek değer olan 0.87, 10 N test kuvvetinde 10 saniye pozlama süresi ile yatay olarak basılan numune için tespit edilmiştir. Ayrıca tüm maruz kalmalar için en yüksek test yükünde üretim yönüne bağlı olarak sürtünme katsayısı sonuçlarındaki fark daha da büyümektedir. 15 N test kuvveti ve 10 saniyelik pozlama süresi için yatay numunelerin katsayı değerleri dikey numunelere göre %47.7 daha fazladır ve bu, tüm sonuçlar için kaydedilen maksimum değerdir.

Elde edilen sonuçlar daha önce DLP ve SLA gibi vat-fotopolimerizasyon tekniği ile yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında bu çalışmada elde edilen sürtünme aralığının mevcut literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu bağlamda Hanon ve ark. yatay olarak DLP baskılı reçinelerin kayma aşınma analizleri sonucunda maksimum 0.86 sürtünme katsayısı değeri gösterdiğini bildirmişlerdir (Hanon ve Zsidai, 2020). Slapnik ve ark. saf reçine ve katı

yağlayıcı ilaveli karışım formunda aşınma numuneleri ürettiler. Araştırmacılar sürtünme katsayısı değerlerinin 0.35 ile 0.75 arasında değiştiğini kaydetti (Slapnik vd., 2020). Öte yandan, SLA baskı için standart renksiz reçinelere odaklanan bazı çalışmalar, C45 gibi çelik karşı yüzeylerin ve daha yüksek test kuvvetlerinin (150 N' a kadar) sürtünme katsayısı değerlerini 0.10-0.12' ye düşürebileceğini gösterdi (Braileanu vd., 2023).

Yazdırma parametrelerine ve kayan yüklere bağlı olarak, test edilen numunelerin aşınma sonuçları Şekil 35' de hacim kaybı olarak görülebilir. Artan maruz kalma süresi seviyeleriyle, üretilen numunelerin aşınma dayanıklılığı genellikle tüm test kuvvetleri için artar. Bu noktada ölçülen sertlik değerleri ve maruz kalma süresine göre tespit edilen değişim eğiliminin altı çizilebilir (Şekil 34). Test edilen numunelerin başlangıç sertlik değerleri, numunelerin plastik deformasyon dayanımında önemli bir rol oynamakta olup, maruz kalma süresinin parçaların sertliği üzerindeki olumlu etkisi, aşınma direncini de beraberinde getirebilmektedir. Test edilen tüm numuneler arasında en düşük hacim kaybı 78 mm³ ile dikey olarak basılan numunede 5 N test kuvvetinde 10 saniye pozlama süresi ile kaydedilirken, bu değer aynı faktör seviyelerinde yatay olarak basılan numunede 81 mm³ olarak kaydedildi.



Şekil 35. Test yüklerini değiştirmek için maruz kalma süresine ve üretim yönüne bağlı olarak SLA baskılı numunelerin hacim kaybı sonuçları; 5N (a), 10N (b) ve 15N (c)

Artan test kuvvetlerinin kuru kayan test malzemesi yüzeyinde daha fazla malzeme kaldırılmasına neden olduğu ancak değişen plastik hasar mekanizmasının hacim kaybının miktarı ve düzeyi üzerinde etki yarattığı bilinmektedir. Ayrıca kayma testleri sırasında temas

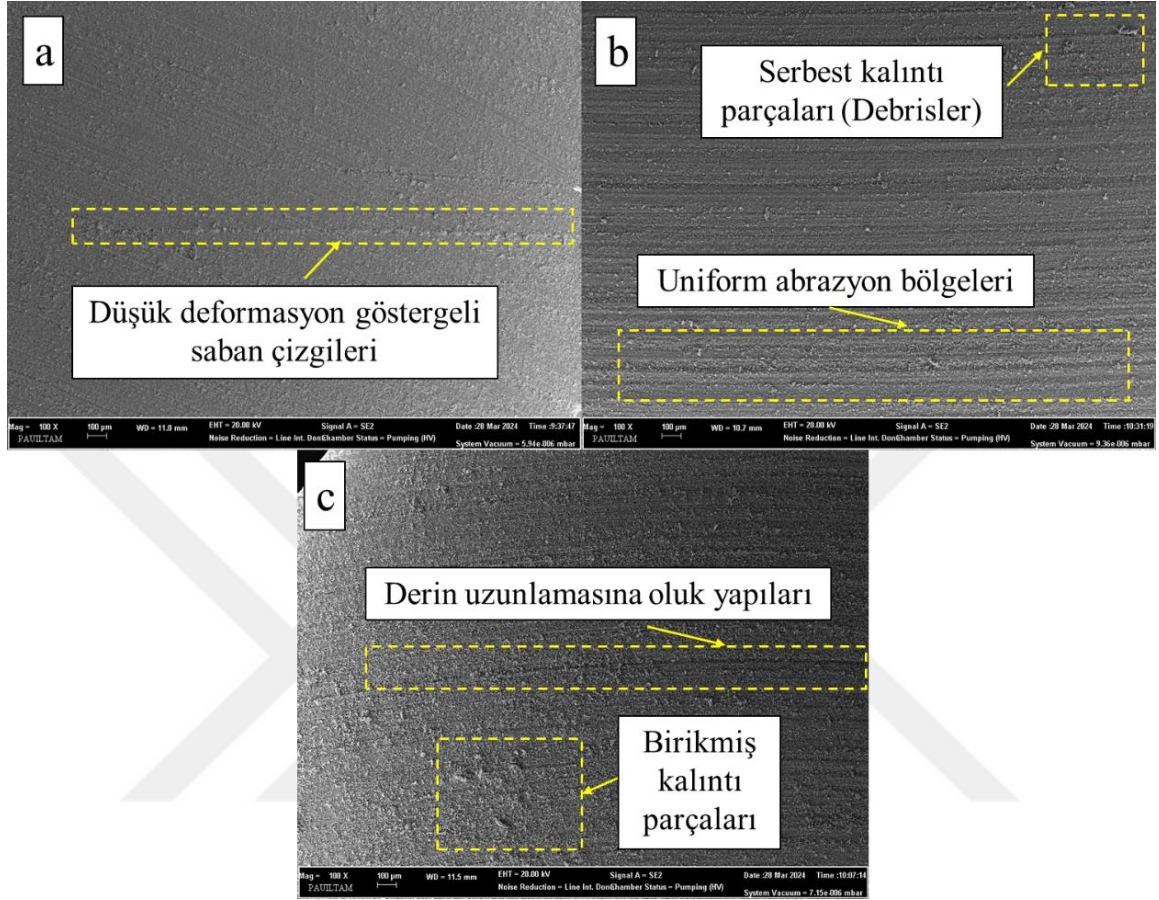
bölgelerinde meydana gelen sürtünmeden dolayı parça yüzeylerinde termal yumuşama etkisi ortaya çıkmaktadır. Test yüklerinin üst sınırları bu durumu daha belirgin bir şekilde tetiklemektedir. Bu çalışmada yatay olarak oluşturulmuş numune için 4 saniye pozlama süresinde 15 N' de yapılan kayma testleri sonucunda en yüksek hacim kaybı 154 mm³ ile bulunmuştur. 15 N yükte yapılan testler sonucunda yatay numunelerde de görüldüğü gibi dikey numunelerde maksimum hacim kaybı 4 saniye pozlama süresinde numuneye ait olup 135 mm³ tür. 10 N ara seviyeye gelince, en büyük hacim kaybı değeri 138 mm³ ile yatay olarak üretilen numunede 4 saniye pozlama süresinde belirlenirken, en küçük hacim kaybı değeri ise 91 mm³ ile dikey olarak inşa edilen numunede 10 saniye pozlama süresinde bulundu.

Üretim yönünün etkisi incelendiğinde, dikey olarak basılan numunelerin genel performansının, en düşük 5 N test kuvvetinde ve 4 ve 6 s' lik daha düşük pozlamalarda meydana gelen bazı istisnalar dışında yatay versiyonlarına göre daha üstün olduğu ileri sürülebilir. Dikey olarak basılan numunelerin bu avantajlı konumu, parça yüzeyi/aşındırıcı karşı yüzeyin ortalama pürüzlü temas noktası sayısını azaltan daha iyi baskı sonrası yüzey kalitesine ve daha yüksek başlangıç sertliğine atfedilebilir. Sonuçlara göre dikey ve yatay numuneler arasındaki en yüksek hacim kaybı farkı %25.2 olarak, 4 saniye pozlama süresiyle üretilen ve 15 N da test edilen numunelerde görülmüştür. En düşük test kuvveti olan 5 N için ise 4 saniyelik dikey olarak üretilen numuneler, 6 saniyelik pozlama süresi ile yatay olanlara göre biraz daha fazla ağırlık kaybetmiştir. Bunun nedeninin, 5 N' daki nispeten yüksek sürtünme katsayısı değerleri ile düşük kuvvet sınırının aşındırıcı, çizik oluşturma kapasitesinin birleşik etkisi olabileceği düşünülmektedir.

3.5 Mikro Ölçekli Hasar Analizleri

Deformasyonun doğasını anlamak için ilgili proses değişkenlerinde mikro ölçekli hasar analizleri yapıldı. Artan test yükü seviyelerinin aşınmış malzeme miktarında artışa yol açtığı ancak hasar tarzının 3B baskı aşamasındaki üretim parametrelerine ve basılan polimer reçinenin mekanik özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebileceği bilinmektedir. Bu durum nihai ürünün tasarım aşaması için önemlidir çünkü gerçek hizmet koşullarında hasar kontrolü ve deformasyon tahmini, çevresel faktörlerin tasarım geometrisi ile kombinasyonunun anlaşılmasıyla yapılabilir. Aşağıda verilen Şekil 36, değişen test kuvvetlerine dayalı olarak aşınmış numunelerin deforme olmuş yüzey yapılarını göstermektedir. Düşük kuvvet seviyelerinde temas yüzeylerinde zayıf plastik

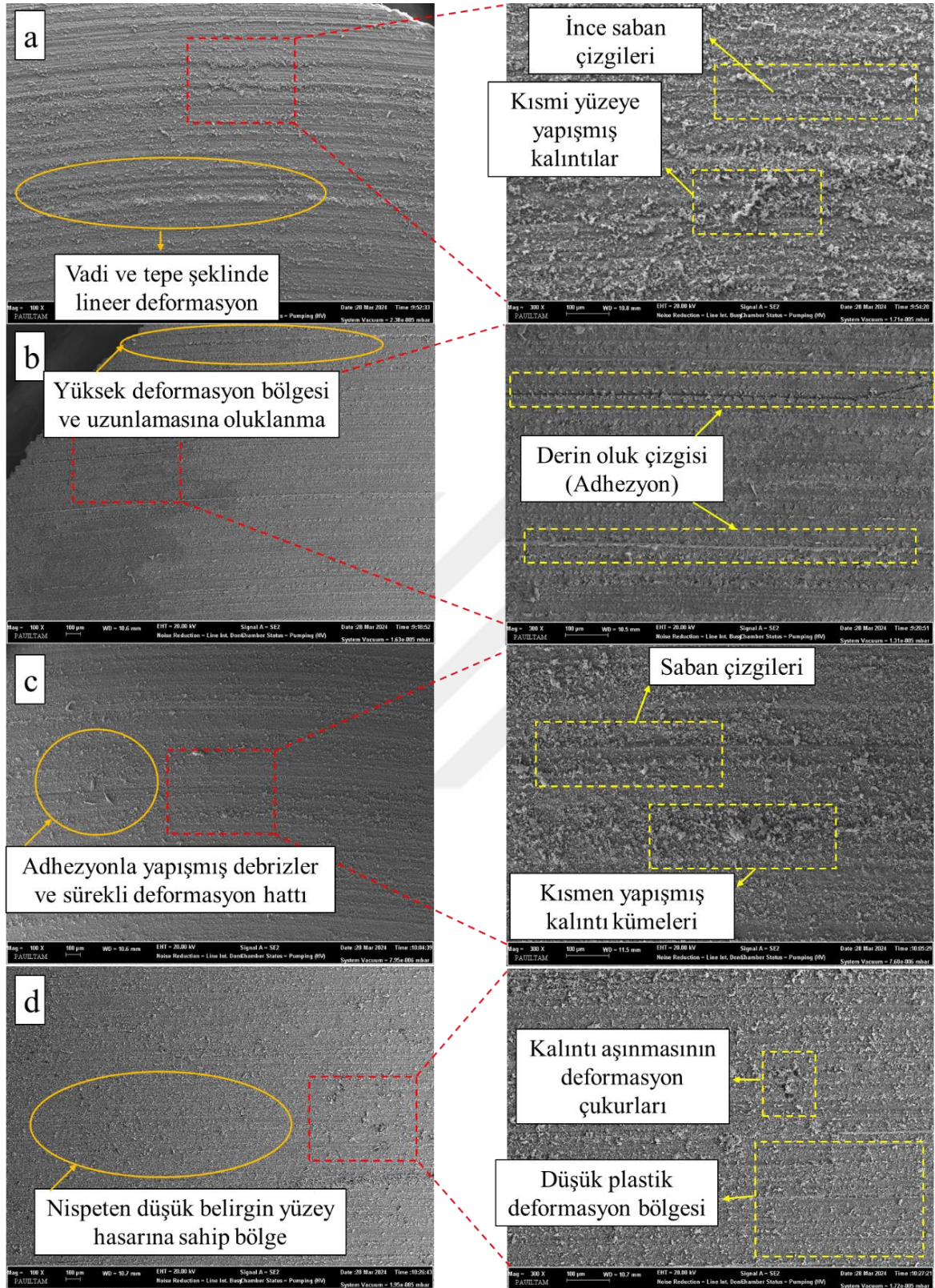
deformasyonun göstergesi olarak nitelendirilen çizilme etkilerinin mevcut olduğu ve ikincil artık parçalarının yeterli miktarda bulunmamasından dolayı deforme olan yüzeylerin diğerlerine göre daha düzgün olduğu gözlenmiştir (Şekil 36 a).



Şekil 36. Artan test kuvvetinin sabit maruz kalma süresi ve üretim yönüne etkisi; 5 N (a), 10 N (b) ve 15 N (c)

Test kuvveti 10 N orta seviyesine ulaştığında (Şekil 36 b), girinti etkisi sonucu karakteristik sürtünme yapıları ortaya çıkmıştır. Ayrıca aşınmış yüzeylerde bazı ayrık döküntü parçaları tespit edilmiştir. Artık parçacıklarının yoğunluğu 5 N' de meydana gelen durumdan daha yüksek ancak 15 N da meydana gelen durumdan daha düşüktür. 15 N' luk en yüksek test kuvveti için (Şekil 36 c), aşınmış yüzeylerde oyuklar derin boyuna çatlakların olduğu gözlemlendi. Bu yüksek deformasyonlu vadiler, döküntü parçacıklarının neden olduğu aşındırıcı aşınmanın ardından oluşmuştur. Öte yandan, 5 N ve 10 N' deki bulgularla karşılaştırıldığında, kayma aşınma testinin dinamik doğasından dolayı döküntü parçalarının kümelenme ve birleşme eğilimi ortaya çıkmıştır. İlgili aşınmış yüzeylerde ilave pürüzlülük ölçümleri yapıldı. Bu noktada ölçülen sonuçlar Şekil 36' yı desteklemiştir ve 5.82 µm olduğu bulundu, 8.67 µm ve 10.12 µm sırasıyla 5, 10 ve 15 N test kuvvetindeki sonuçlardır.

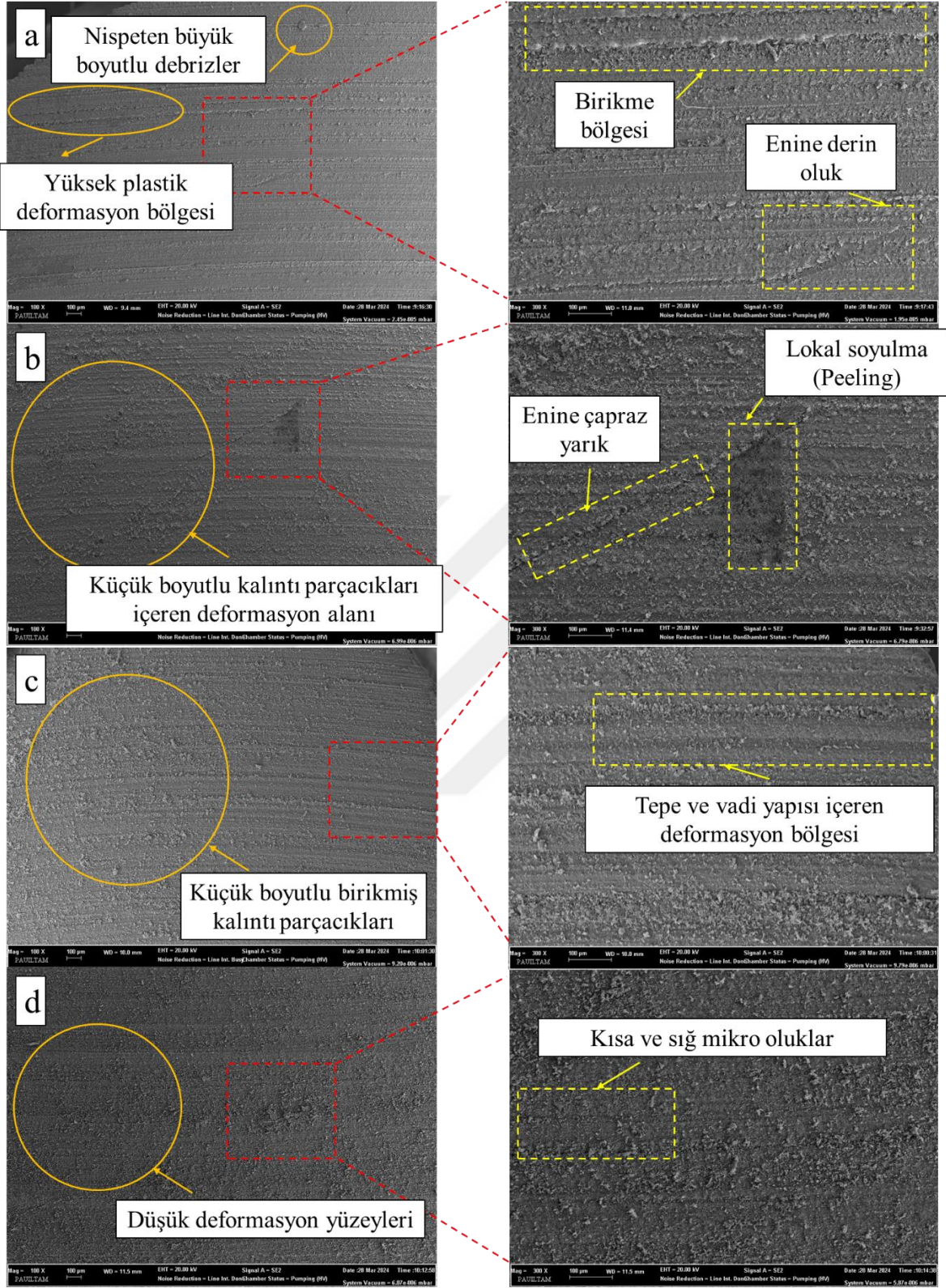
Şekil 37, test edilen dikey numunelerin aşınmış yüzeylerinin, değişen maruz kalma sürelerine bağlı olarak en şiddetli yük olan 15 N' deki SEM görüntülerini göstermektedir. En düşük 4 saniyelik sürede tepe ve vadi yapıları oluştuğu görüldü ve genellikle birikme aşınmasının ardından oluşan tipik mikro boşluklar görülmedi. Yakından bakıldığında deformasyon alanında ince çizik çizgilerinin ve kısmen birleşmiş artık parçalarının belirginleştiği görülmüştür. 6 saniyelik pozlama süresi boyunca test edilen parçaların kayma yüzeyinde uzun ve derin oluklar tespit edildi ve bu yüksek plastik deformasyon bölgelerine bağımsız döküntü parçacıkları da eşlik ettiği görülmüştür. Ayrıca, numune yüzeyi ile arayüzey arasındaki artan temas sıcaklığıyla birlikte, nispeten soğuk arayüzey parçacıkları ilave aşındırıcı aşınma modunu tetikleyebilir. Tüm bu mekanizmalar dikey numuneler arasında en yüksek hacim kaybı sonuçlarının olası bir nedeni olabilir (Şekil 35 c). 8 saniye pozlama ile basılan numunelerin aşınmış yüzeylerinde ise, ince pul şeklinde sürekli deformasyon bölgelerinin yanı sıra, ayrılan artık parçalarının yükselen yüzey difüzyon eğimi nedeniyle ortaya çıkan lokal birikme bölümleri de tespit edilmiştir. Bu tür bir hasar tarzı, temas yüzeylerinden yayılan sürtünme ısısına atfedilebilir ve birikme aşınmanın baskın olduğu karışık tip hasarın bir işaretidir. Benzer şekilde 10 saniye pozlama süresi ile üretilen numunelerin aşınmış yüzeylerinde adezyon aşınması sonucu oluşan mikro çukurcuklara rastlanmıştır. Ayrıca bu numunelerde herhangi bir derin oluk benzeri yapıya veya uzun yüzey çatlaklarına rastlanmamıştır.



Şekil 37. Pozlama süresine bağlı olarak en şiddetli durumdaki 15 N' deki dikey baskılı numuneler için aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri; 4s (a), 6s (b), 8s (c) ve 10s (d)

Şekil 38' de farklı pozlama sürelerine göre yatay numunelerin aşınmış yüzeyleri gösterilmektedir. 4 saniye pozlama süresi ile basılan numunelerin aşınmış yüzeylerinde büyük sürtme bölgelerine ve derin oluklara varan şiddetli plastik deformasyonun mevcut

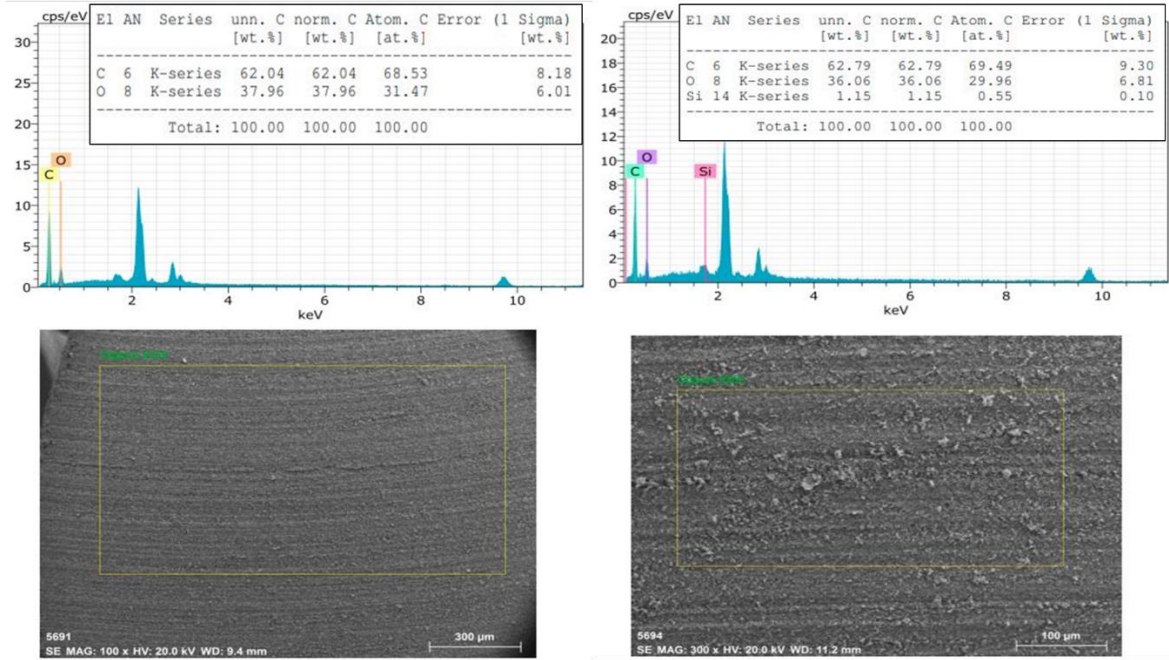
olduğu görülmüştür. Numunelerin düşük sertliğinin sinerjik etkisi ve ayrı ayrı büyük boyutlu döküntü talaşlarının varlığı nedeniyle oluşan yarık benzeri yapılar hem doğrusal hem de çapraz yönlerdeydi. Burada, sıkıştırmaya dayalı plastik deformasyon ve abrazif aşınmadan oluşan hasarın karışık tip doğası, tüm numuneler arasında en yüksek hacim kaybı sonuçlarının alınmasında artan baskı kuvveti sayılabilir. 6 saniye pozlama süresi ile üretilen numunelerde aşınmış yüzeylerde küçük boyutlu döküntü parçacıkları içeren plastik deformasyon bölgeleri, bölgesel soyulma hasarı ve oluk benzeri yapılar mevcuttu. Hasarlı yüzeydeki soyulma etkisi bu numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin diğerlerine göre yüksek olmasından kaynaklanıyor olabilir. 8 saniye pozlama süresine sahip numunelerin yüzeylerinde, küçük boyutlu artık parçaları ve yüzeysel tepe ve vadi alanları bulunan çizgisel bölgeleri mevcut olmasına rağmen, azalan sürtünme katsayısı ve artan sertlik özellikleriyle birlikte ana plastik deformasyonun derecesi de düşmüştür. Baskı aşamasında pozlama süresi 10 saniyeye ayarlandığında, aşınmış numunelerde düşük hasarın göstergesi olarak yalnızca kısa ve sık çizik çizgileri vardı. Bunun yanı sıra, hasardan en çok etkilenen bölgelerin yakınında döküntü oluşumu, talaş kümelenmesi ve polimer yapışması tespit edildi. Bulgular, kuru kayma testi boyunca test parçası yüzeyi ile aşındırıcı malzeme arasındaki temas koşulunun fiziksel durumundaki bir değişikliğe işaret etmektedir. Buna göre, aşınma testinin başlangıç aşamasında temas bölgelerinde polimer/aşındırıcı durumu etkili olurken, bileşenler arasındaki sürtünme ısısı ve malzeme transferi nedeniyle devam eden kayma ile konfigürasyon polimer/polimere kaymıştır. Bu anlamda, dikey numunelerde de olduğu gibi, aşındırıcının azalan etkisi, 10 saniye pozlama süresiyle basılan yatay baskılı numuneler için en iyi aşınma dayanıklılığını açıklayabilir. Temas yüzeyi eşleşmelerinin yukarıda belirtilen dinamik karakteristiğini analiz etmek için aşınmış malzemelerin farklı yüzey bölümlerinde ek EDS analizleri yapıldı.



Şekil 38. Pozlama süresine bağlı olarak en şiddetli durumdaki 15 N' deki yatay baskılı numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri; 4s (a), 6s (b), 8s (c) ve 10s (d)

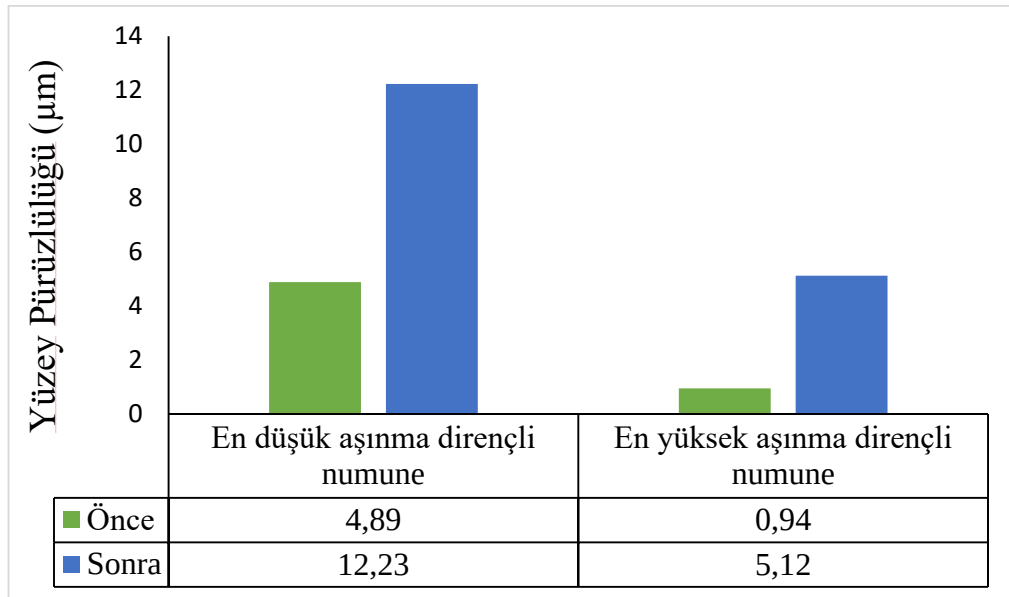
Şekil 39, tüm numuneler arasında en yüksek ve en düşük aşınma oranlarına sahip numunelerin sonuçlarını göstermektedir. Temas yüzeyi uyum durumunun, toplam hacim kaybını ve yüzey hasarının tipini belirleyen temel faktörlerden biri olduğu fark edildi. En

düşük hacim kaybında ise aşınmış yüzeylerde tespit edilen Si atomları ile sert karşı yüzeyin etkinliği devam etmiştir. Ancak hacim kaybı en düşük olan numunelerde durum farklıydı ve numune yüzeylerinin bazı kısımlarında Si atomuna rastlanılmadı.



Şekil 39. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji dağıtımli spektroskopi (EDS) analizleri ile en az aşınmış (A), en çok aşınmış (B) örnekler

En yüksek ve en düşük aşınma direncine sahip numunelerin kuru kaymalı sürtünme testlerinin sonrasında yapılan hasarlı yüzey pürüzlülük ölçümleri de EDS sonuçlarını desteklemektedir.



Şekil 40. En düşük ve en yüksek aşınma dirençli numunelerin yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması

Ayrıca tüm hasar analiz çalışmaları dikkate alındığında tespit edilen tüm deformasyonlar ve test edilen koşulların sonuçları Tablo 4' te niteliksel olarak vurgulanmıştır.

Tablo 4. Test sonuçlarının hasar özetleri

Test Kuvveti	Pozlama Süresi				
	Yön	4 s	6 s	8 s	10 s
5 N	Dikey	Küçük oluklarla birlikte orta düzeyde deformasyon	Çiziklerle birlikte düşük deformasyon	Çiziklerle birlikte düşük düzeyde deformasyon	Çiziklerle birlikte çok düşük düzeyde deformasyon
	Yatay	Küçük oluklarla birlikte orta düzeyde deformasyon	Çiziklerle birlikte orta düzeyde deformasyon	Çiziklerle birlikte düşük düzeyde deformasyon	Çiziklerle birlikte düşük düzeyde deformasyon
10 N	Dikey	Belirgin çizikler ile yüksek düzeyde deformasyon	Belirgin çizikler ile yüksek düzeyde deformasyon	Enkaz parçaları ile orta düzeyde deformasyon	Sürme bölgeleri ile orta düzeyde deformasyon
	Yatay	Sürme ile yüksek düzeyde deformasyon	Belirgin çizikler ile yüksek düzeyde deformasyon	Belirgin çizikler ile yüksek düzeyde deformasyon	Sürme ile orta düzeyde deformasyon
15 N	Dikey	Üstte ve vadide ciddi hasar	Büyük oluklar ile yüksek düzeyde deformasyon	Oluklar ve enkaz ile yüksek düzeyde deformasyon	Çukurlar ve enkaz birlikte orta düzeyde deformasyon
	Yatay	Sürme ile yüksek plastik düzeyde deformasyon	Yerel soyulma ile yüksek düzeyde deformasyon	Sürme ile orta düzeyde deformasyon	Mikro oluklar ile düşük düzeyde plastik deformasyon

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

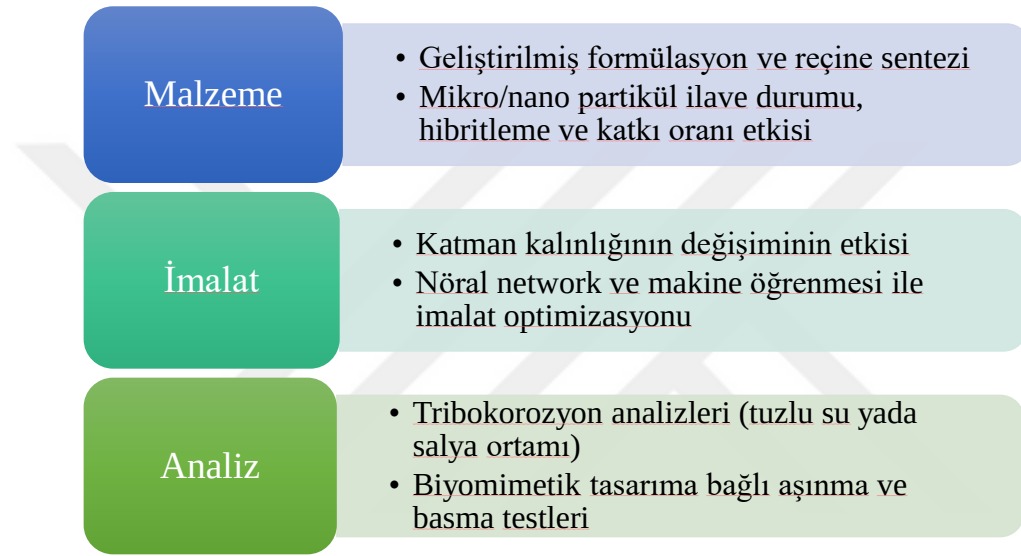
Bu deneysel tez çalışması ışığında, 3B baskılı dış örneklerinin tribolojik özellikleri açısından bazı teknik perspektifler çizilebilir. Bu noktada fotopolimerizasyon bazlı SLA teknolojisinin, reçine tipi polimerler için yüksek boyutsal doğruluk ve iyi yüzey kalitesi açısından oldukça kullanışlı ve çok yönlü bir teknik olduğu vurgulanabilir. Ayrıca dikey olarak basılan numuneler, ilgili test yüzeylerinin daha yüksek sertlik değerleri ve etkin pozlama kabiliyeti nedeniyle yatay numunelere göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek aşınma dayanımı özellikleri sergilemiştir.

Genellikle tüm test kuvvetleri için hem dikey hem de yatay numunelerde artan pozlama süresi değerlerine bağlı olarak hacim kaybı sonuçlarında azalma eğilimi görülmüştür. Test kuvveti seviyeleri 5 N' den 15 N' a değıştikçe ortalama sürtünme katsayısı değerleri gözle görülür şekilde düştü ancak pozlama süresi ile sürtünme katsayısı sonuçları arasında doğrudan bir artan/azalan ilişki yoktur. Daha yüksek yüklerde numunelerin hasarlı yüzeylerinde girinti yarıkları ve oyuklar gibi belirgin plastik deformasyon izleri mevcuttur. Ancak düşük test kuvvetlerinde küçük çizilme etkileri ve küçük sürtme deformasyonu tespit edilmiştir. Testler sırasında pozlama süresi değerleri ve kayma mesafesi ile birlikte, ilgili yüzeylerdeki hasar şekli polimer/seramik başlangıç formundan polimer/polimere değışmiş, dolayısıyla daha yüksek pozlama süreleriyle basılan numuneler, diğerlerine göre daha iyi aşınma davranışları yansıtmıştır.

- Yatay olarak basılan numunelerin sürtünme katsayıları daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Dikey basılan numunelerin daha iyi yüzey kalitesine sahip olduğu görülmüştür.
- Pozlama süresi her iki yönde basılan numunelerde de aşınma direncini olumlu yönde etkilemiştir.
- Düşük pozlama sürelerine sahip yüzeylerde oluklar ve döküntü parçalarının olduğu görülmüştür.

4.2. Öneriler

Eklemeli imalatın gerek prostodontik gerekse dental modelleme anlamında oldukça ciddi bir gelecek potansiyeli taşıdığı ilgili literatür ve meslek kuruluş raporlarına bilinmektedir. Gelişen teknoloji ve artan hız rekabetinin sağlık sektörüne olan yansımaları düşünüldüğünde, yeni nesil yapay zekâ temelli optimizasyon ve teknolojileri dental uygulamalar bazında mekanik performans, fiziksel özellikler ve maliyet üçgeninde faydalı olabilir. Burada, diş hekimliği, biyomedikal mühendisliği, makine mühendisliği ve yazılım branşları arasında disiplinler arası faaliyetlere hız verilebilir.



Şekil 41. Tez Çalışması Sonucu Sunulan Öneriler

Bir diğer konu ise yapay geçici dişler için tribo-korozyon meselesidir. Bu tarz geçici diş yapılarının ağız içi sıvıları ve dişlerin gerçekleştirdiği ezme faaliyetine bağlı tribo-korozyon performansları incelenmelidir. Girdi değişkenleri olarak imalat proses değişkenleri alınabilir ve farklı metodolojiler için her bir süreç deneysel olarak mekanizma temelli incelenebilir. Bu sayede geçici diş yapılarının aşınma performansı ve deformasyonun doğası keşfedilebilir.

Güncel sürece bakılırsa; model oluşturma, prototipleme, geçici diş tedavisi, ortodontik uygulamalar ve implant tedavileri diş hekimliğinin kullandığı en aktif alanlardır ve fotopolimerizasyon odaklı eklemeli imalatın bu yöndeki katkısının ileriki yıllarda da devam etmesi öngörülmektedir. Eklemeli imalatın kişiye özgü ve hızlı tedavi fırsatlarına imkân tanınması nedeniyle, reçine bazlı malzeme formülasyonlarının da önümüzdeki yıllarda çeşitlenmesi ön görülmektedir. Bu sayede, diş hekimliği alanında kritik bir öneme sahip olan basma dayanımı, rijitlik, korozyon direnci, sertlik ve aşınma direnci gibi fonksiyonel

özelliklere hedef odaklı yaklaşmak mümkün olacaktır. Geçtiğimiz yıllar boyunca yapılan birçok değerli çalışma neticesinde, özellikle imalat süreç parametreleri ile hedef çıktı özellikleri arasında direkt bir ilişki olduğu saptanmıştır. Bu neticeler ışığında, optimizasyon tekniklerinin ve disiplinler arası bilimsel çalışmaların önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır. Hızla değişen ve gelişen endüstriyel dünyada, ortak bir çalışma branşı olan insan sağlığı konusunda üç boyutlu yazıcıların birçok farklı disiplini bir araya getirme gücü bulunmaktadır. Bu durum diş hekimliği ile ağız-çene cerrahisi branşlarında da yüksek bir potansiyel taşımaktadır. Bir diğer taraftan, bireysel klinik uygulamalarında 3B baskı işlemleri ilk yatırım maliyetinden sonra modelleme, prototipleme ve geçici diş uygulamalarında diğer geleneksel sistemlere göre daha süratli ve ekonomik bir hale geçmektedir. Bu eğilim, ilerleyen süreçte diş hekimliği pazarında eklemeli imalatın yüzdelik payını da artıracaktır.

KAYNAKÇA

- Aditya, A., Lele, S and Aditya, P. (2015). Current status of knowledge, attitude, and perspective of dental practitioners toward cone beam computed tomography: A survey. *Journal of Oral and Maxillofacial Radiology*, 3(2), 54-57.
- Agashe, K. D., Sachdeva, A and Chavan, S. S. (2020). 3D printing and advance material technology. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 13(2), 1899-1936.
- Ahn, J. J., Huh, J. B and Choi, J. W. (2019). In vitro evaluation of the wear resistance of provisional resin materials fabricated by different methods. *The Journal of Korean Academy of Prosthodontics*, 57(2), 110-117.
- Akıtız, İ., Aydın, K ve Topcu, A. (2020). Stereolitografi (SLA) Tekniği ile Basılan 3 Boyutlu Polimer Yapılarda İkincil Kırılma Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 949-958.
- Alshamrani, A. A., Raju, R and Ellakwa, A. (2022). Effect of printing layer thickness and postprinting conditions on the flexural strength and hardness of a 3D-printed resin. *BioMed Research International*, 21(1), 137.
- Alsoufi, M. and Elsayed, A. (2018). Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer. *Materials Sciences and Applications*, 9(1), 11-40.
- ASTM 52900-15 standard terminology for additive manufacturing-general principles-terminology. URL: <https://doi.org/10.1520/ISOASTM52900-15> (Erişim tarihi: 16.05.2023) (Link 1)
- Bayarsaikhan, E., Lim, J. H., Shin, S. H., Park, K. H., Park, Y. B., Lee, J. H., Kim, J. E. (2021). Effects of postcuring temperature on the mechanical properties and biocompatibility of three-dimensional printed dental resin material. *Journal Polymers*, 13(8), 1180.
- Bhargav, A., Sanjairaj, V., Rosa, V., Feng, L.W., Yh, J.F. (2017). Applications of additive manufacturing in dentistry. *Journal of Biomedical Materials Research B: Applied Biomaterials*, 106(5), 2058-2064.
- Bilgin, M.S., Erdem, A., Aglarci, O.S., Dilber, E. (2015). Fabricating Complete Dentures with CAD/CAM and RP Technologies. *Journal Prosthodont*, 24(7), 576- 579.
- Bolat, Ç., ve Ergene, B. (2022). An investigation on dimensional accuracy of 3D printed

- PLA, PET-G and ABS samples with different layer heights. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 449-458.
- Braileanu, P.I., Calin, A., Dobrescu, T.G., Pascu, N. E. (2023). Comparative examination of friction between additive manufactured plastics and steel surface. *Materiale Plastice*. 60(3), 48-57.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Fino, P. (2017). Overview on Additive Manufacturing Technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 593-612.
- Chaput, C. and Chartier, T. (2007). Fabrication of ceramics by stereolithography. *RTEjournal-Forum für Rapid Technologie*, 4(1), 8.
- Chen, J., Zhang, Z., Chen, X., Zhang, C., Zhang, G., Xu, Z. (2014). Design and manufacture of customized dental implants by using reverse engineering and selective laser melting technology. *Journal Prosthet Dent*, 112(1), 1088-1095.
- Chia, H.N. and Wu, B.M. (2015). Recent advances in 3d printing of biomaterials. *Journal Bio Engineering*, 9(4), 6.
- Chockalingam, K., Jawahar, N and Chandrasekhar, U. (2006). Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. *Journal Rapid Prototyp*, 12(2), 106-113. doi:10.1108/ 13552540610652456
- Dean, D., Wallace, J., Siblani, A., Wang, M. O. Kim, K., Mikos, A. G., Fisher, J. P. (2012). Continuous digital light processing (CDLP): Highly accurate additive manufacturing of tissue engineered bone scaffolds. *Virtual and Physical Prototyping*, 7(1), 13-24.
- Dawood, A., Marti, B. M., Sauret, J. V., Darwood, A. (2015). 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*. 219(1), 11-12.
- De Castro, E. F., Nima, G., Rueggeberg, F. A and Giannini, M. (2022). Effect of build orientation in accuracy, flexural modulus, flexural strength, and microhardness of 3D-Printed resins for provisional restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 136, 105479.
- Dehurtevent, M., Robberecht, L., Hornez, J.C., Thuault, A., Deveaux, E., Behin, P. (2017). Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing. *Dent Mater*, 33(5), 477-485.
- Dikova, T. D., Dzhendov, D. A., Ivanov, D and Bliznakova, K. (2018). Dimensional accuracy and surface roughness of polymeric dental bridges produced by different 3D printing processes. *Archives of Materials Science and Engineering*, 94(2), 65-75.
- Endruweit, A., Johnson, M.S and Long, A.C. (2006). Curing of composite components by

- ultraviolet radiation. *Polymer Composites*, 27(2), 119-128.
- Erickson, D.M., Chance, D., Schmitt, S., Mathts, J. (1999). An opinion survey of reported benefits from the use of stereolithographic models. *Journal Oral Maxillofac Surg*, 57(1), 1040-1043.
- Eufinger, H., Wehmöller, M., Machtens, E., Heuser, L., Harders, A., Kruse, D. (1995). Reconstruction of craniofacial bone defects with individual alloplastic implants based on cad/cam-manipulated ct-data. *Journal Cranio Maxill Surg*, 23(1), 175-81.
- Farkas, A. Z., Galatanu, S. V and Nagib, R. (2023). The Influence of Printing Layer Thickness and Orientation on the Mechanical Properties of DLP 3D-Printed Dental Resin. *Journal Polymers*, 15(5), 1113.
- Frizziero, L., Santi, G.M., Liverani, A., Napolitano, F., Papaleo, P., Maredi, E. (2020). Computer-aided surgical simulation for correcting complex limb deformities in children. *Applied Sciences*, 10(15), 5181.
- Gad, M. M., Alalawi, H., Akhtar, S., Al-Ghamdi, R., Alghamdi, R., Al-Jefri, A., Al-Qarni, F. D. (2023). Strength and wear behavior of three-dimensional printed and prefabricated denture teeth: an in vitro comparative analysis. *European Journal of Dentistry*, 17(4), 1248-1256.
- Gagg, G., Ghassemieh, E and Wiria, F. E. (2013). Effects of sintering temperature on morphology and mechanical characteristics of 3D printed porous titanium used as dental implant. *Materials Science and Engineering*, 33(7), 3858-3864.
- Garcia, R. M., Bataller, T. A., Cabrera, C. J. A., Velasco, G. J. M., Castillo, A. J. J. (2022). A study of tensile and bending properties of 3D-printed biocompatible materials used in dental appliances. *Journal of Materials Science*, 1-16.
- Halloran, J.W. (2016). Ceramic stereolithography: Additive manufacturing for ceramics by photopolymerization. *Annual Review of Materials Research*, 46(1), 19-40.
- Hanon, M.M and Zsidai, L. (2020). Sliding surface structure comparison of 3D printed polymers using FDM and DLP technologies. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 749(1), 12015.
- Hazeveld, A., Slater, J.J.H., Ren, Y. (2014). Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *Am Journal Orthod Dentofac*, 145(1), 108-15.
- Hossain, M., Navaratne, R and Peric, D. (2020). 3D printed elastomeric polyurethane: Viscoelastic experimental characterizations and constitutive modelling with nonlinear viscosity functions. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 126(4), 1-12.

- <https://www.medicalplasticsnews.com/medical-plastics-industry-insights /medical-plastics-3d-printing-insights/what-makes-dental-3d-printing-the-new-normal-in-dentistry/> (Erişim tarihi: 18.05.2023) (Link 2)
- <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/dental-3d-printing-market> (Erişim tarihi: 18.05.2023) (Link 3)
- <https://www.zongheng3d.com/sla-3d-printer-resin-types/> (Erişim tarihi: 26.05.2023) (Link 4)
- <https://www.dokuzkimya.com/products/alias-dental-temp-recinesi> (Erişim tarihi: 26.05.2023) (Link 5)
- Hyzy, S.L., Cheng, A., Cohen, D.J., Yatzkaier, G., Whitehead, A.J., Clohessy, R.M. (2016). Novel hydrophilic nanostructured microtexture on direct metal laser sintered Ti-6Al-4V surfaces enhances osteoblast response in vitro and osseointegration in a rabbit model. *Journal Biomed Mater Res Part A*, 104(1), 2086- 98.
- Jeong, Y.G., Lee, W.S., Lee, K.B. (2018). Accuracy evaluation of dental models manufactured by CAD/CAM milling method and 3D printing method. *Journal Adv Prosthodont*, 10(3), 245-251.
- Ji, F., Chunyu, Z., and Xianshuai, C. (2018). Structure optimization of porous dental implant based on 3D printing. *Materials Science and Engineering*, 324(1), 12-16.
- Kashyap Katta and Anurag Datt, Yüksek Lisans Tezi, Analysis of PA6 Powder Ageing during the Selective Laser Sintering Process, *Aelen University*, 2019.
- Kasparova, M., Grafova, L., Dvorak, P., Dostalova, T., Prochazka, A., Eliasova, H. (2013). Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3d digital study models. *Biomedical Engineering online*, 12(1), 49.
- Kim, J. H., Moon, Y. K., Jonathan, C., Knowles, S. C., Hyejong, K., Sang, H. P., Sung, M. P. (2020). Mechanophysical and biological properties of a 3D-printed titanium alloy for dental applications. *Dental Materials*, 36(7), 945-958.
- Koç, E ve Yılmaz, F. (2016). Biyomedikal Parçaların Eklemeli İmalatla (3D Baskı) Üretimi. *1. Ulusal Biyomedikal Cihaz Tasarımı ve Üretimi Sempozyumu*, 1(1), 8.
- Koh, E. S., Cha, H. S., Kim, T. H., Ahn, J. S., Lee, J. H. (2020). Color stability of three dimensional-printed denture teeth exposed to various colorants. *Journal Korean Acad Prosthodont*, 58(1), 1-6.
- Li, R., Wang, Y., Hu, M., Wang, Y., Xv, Y., Liu, Y., Sun, Y. (2019). Strength and adaptation of stereolithography-fabricated zirconia dental crowns: an in vitro study. *Int Journal Prosthodont*, 32(5), 439-443.

- Lozada, J.L., Garbacea, A., Goodacre, C.J., Kattadiyil, M.T. (2014). Use of a digitally planned and fabricated mandibular complete denture for easy conversion to an immediately loaded provisional fixed complete denture, Part 1. Planning and surgical phase. *International Journal of Prosthodontics*, 27(1), 417-21.
- Lu, Y., Mapili, G., Suhali, G., Chen, S., Roy, K. A. (2006). Digital micro-mirror device-based system for the microfabrication of complex, spatially patterned tissue engineering scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 77(2), 396-405.
- Maeda, Y., Minoura, M., Tsutsumi, S., Okada, M., Nokubi, T.A. (1994). CAD/CAM system for removable denture. Part I: Fabrication of complete dentures. *Internal Journal Prosthodont*. 7(1), 17-21.
- Marcel, R., Reinhard, H., Andreas, K. (2020). Accuracy of CAD/CAM-fabricated bite splints: milling vs 3D printing. *Clin Oral Investig*, 24(12), 4607-4615.
- Marcenes, W., Kassebaum, N.J., Bernabe E., Flaxman, A., Naghavi, M., Lopez, A. (2013). Global burden of oral conditions in 1990-2010: a systematic analysis. *Journal material*, 92(1), 592-597.
- Mayer, J., Stawarczyk, B., Vogt, K., Hickel, R., Edelhoff, D., Reymus, M. (2021). Influence of cleaning methods after 3D printing on two-body wear and fracture load of resin-based temporary crown and bridge material. *Clinical Oral Investigations*, 25(1), 5987-5996.
- Melchels, F.P., Feijen, J and Grijpma, D.W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(1), 6121-6130.
- Miedzinska, D., Gieleta, R and Małek, E. (2020). Experimental study of strength properties of SLA resins under low and high strain rates. *Mechanics of Materials*, 141(2), 1-18.
- Milovanovic, A., Sedmak, A., Golubovic, Z., Mihajlovic, K. Z., Zurkic, A., Trajkovic, I., Milosevic, M. (2021). The effect of time on mechanical properties of biocompatible photopolymer resins used for fabrication of clear dental aligners. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 119(1), 494.
- Miracle, A.C and Mukherji, S.K. (2009). Conebeam CT of the head and neck, part 2: Clinical applications. *AJNR Am Journal Neuroradiol*, 30(1), 1285-92.
- Oropallo, W. and Piegl, L. A. (2016). Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 32(1), 135-148.

- Osman, R.B., Veen, A.J., Huiberts, D., Wismeijer, D., Alharbi, N. (2017). 3d-printing zirconia implants; a dream or a reality? An in-vitro study evaluating the dimensional accuracy, surface topography and mechanical properties of printed zirconia implant and discs. *Journal Mech Behav Biomed*, 75(1), 521-28.
- Park, J.H., Cho, I. H., Shin, S. Y., Choi, Y. S. (2015). The treatment of an edentulous patient with DENTCA™ CAD/CAM Denture. *Journal Korean Acad Prosthodont*, 53(1), 19-25.
- Park, J. M., Ahn, J. S., Cha, H. S., Lee, J. H. (2018). Wear resistance of 3D printing resin material opposing zirconia and metal antagonists. *Journal Materials*, 11(6), 1043.
- Peng, W., Xu, L., You, J., Fang, L., Zhang, Q. (2016). Selective laser melting of titanium alloy enables osseointegration of porous multi-rooted implants in a rabbit model. *Biomed Eng online*, 15-85.
- Pham, D. M., Gonzalez, M. D., Ontiveros, J. C., Kasper, F. K., Frey, G. N., Belles, D. M. (2021). Wear resistance of 3D printed and prefabricated denture teeth opposing zirconia. *Journal of Prosthodontics*, 30(9), 804-810.
- Ramakrishnaiah, R., Mohammad, A., Divakar, D.D., Kotha, S.B., Celur, S.L., Hashem, M.I. (2017). Preliminary fabrication and characterization of electron beam melted Ti–6Al–4V customized dental implant. *Saudi Journal Biol Sc*, 24(1), 787-96.
- Redwood, B. (2017). Additive manufacturing technologies overview. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview> (25.09.2017).
- Revilla-Leon, M., Gonzalez, M. O., Perez, L. J., Sanchez, R. J. L., Özcan, M. (2018). Position accuracy of implant analogs on 3d printed polymer versus conventional dental stone casts measured using a coordinate measuring machine. *Journal of Prosthodont*, 27(6), 560-67.
- Sachlos, E and Czernuszka, J. (2003). Making tissue engineering scaffolds work. Review: The application of solid freeform fabrication technology to the production of tissue engineering scaffolds. *Eur Cell Mater*, 5(1), 39-40.
- Saheb, S. H., and Kumar, J. V. (2020). A comprehensive review on additive manufacturing applications. *AIP Conference Proceedings*, 2281(1), 4-5.
- Salmi, M. (2021). Additive manufacturing processes in medical applications. *Materials*, 14(1), 191.
- Schmidleithner, C and Kalaskar, D.M. (2018). Stereolithography. *IntechOpen*, 88(5) 78147.
- Shaoki, A., Xu, J.Y., Sun, H., Chen, X.S., Ouyang, J., Zhuang, X.M. (2016).

- Osseointegration of threedimensional designed titanium implants manufactured by selective laser melting. *Biofabrication*, 8(1), 45014.
- Shim, J. S., Kim, J. E., Jeong, S. H., Choi, Y. J., Ryu, J. J. (2020). Printing accuracy, mechanical properties, surface characteristics, and microbial adhesion of 3D-printed resins with various printing orientations. *The Journal of prosthetic dentistry*, 124(4), 468-475.
- Shin, Y and Becker, M.L. (2020). Alternating ring-opening copolymerization of epoxides with saturated and unsaturated cyclic anhydrides: Reduced viscosity poly(propylene fumarate) oligomers for use in cDLP 3D printing. *Polymer. Chem*, 11(1), 3313-3321.
- Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A. R., Kelly, D. Samulski, E. T. (2015). Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science Journals*, 347(6228), 1349-1352.
- Simeon, P., Unkovskiy, A., Sarmadi, B. S., Nicic, R., Koch, P. J., Beuer, F., Schmidt, F. (2024). Wear resistance and flexural properties of low force SLA-and DLP-printed splint materials in different printing orientations: An in vitro study. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 152(1) 8-9.
- Singh, S., Jain, A., Chaudhary, P., Gupta, R., Mali, H. S. (2023). Optimization of dimensional accuracy and surface roughness in m-SLA using response surface methodology. *Rapid Prototyping Journal*, 29(6), 1324-1339.
- Slapnik, J., Stiller, T., Wilhelm, T and Hausberger, A. (2020). Influence of solid lubricants on the tribological performance of photocurable resins for vat photopolymerization. *Lubricants*, 8(12), 104.
- Steenberghe, V., Glauser, R. D., Blomback, U., Andersson, M., Schutyser, F., Pettersson, A. (2005). A computed tomographic scan-derived customized surgical template and fixed prosthesis for flapless surgery and immediate loading of implants in fully edentulous maxillae: A prospective multicenter study. *Clinical Implant Dentistry Related Research*. 7(1), 111-20.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat 3B baskı teknolojileri ve uygulamaları. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-375.
- Topsakal, K. G., Aksoy, M and Duran, G. S. (2023). The effect of aging on the mechanical properties of 3-dimensional printed biocompatible resin materials used in dental applications: An in vitro study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 164(3), 441-449.
- Travitzky, N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert, D. I., Schlier, L. (2014). Additive

- manufacturing of ceramic-based materials. *Adv Eng Mater*, 16(1), 729-54.
- Trzaskowski, M., Manka, M. K., Szczesio, W. A., Sokolowski, J., Kostrzewa, J. J., Mierzwinska, N. E. (2023). Evaluation of mechanical properties of 3D-printed polymeric materials for possible application in mouthguards. *Polymers*, 15(4), 898.
- Tsai, T. H., Jeyaparakash, N and Yang, C. H. (2020). Non-destructive evaluations of 3D printed ceramic teeth: Young's modulus and defect detections. *Ceramics International*, 46(14), 22987-22998.
- Wallace, J. (2014). Validating Continuous Digital Light Processing (cDLP) Additive Manufacturing Accuracy and Tissue Engineering Utility of a Dye-initiator Package. *Biofabrication*, 6(1), 15003, 15014.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., Hui, D. (2017). 3d printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Compos Part B-Eng*, 110(1), 442-58.
- Watters, M. P and Bernhardt, M. L. (2018). Curing parameters to improve the mechanical properties of stereolithographic printed specimens. *Rapid Prototyping Journal*, 24(1), 46-51.
- Wu, H., Cheng, Y., Liu, W., He, R., Zhou, M., Wu, S. (2016). Effect of the particle size and the debinding process on the density of alumina ceramics fabricated by 3d printing based on stereolithography. *Ceram Int*, 42(1), 17290-17294.
- Wu, J., Wang, X., Zhao, X., Zhang, C. (2012). Gao B. A study on the fabrication method of removable partial denture framework by computer-aided design and rapid prototyping. *Rapid Prototyp Journal*, 18(1), 318-323.
- Xia, J., Ip, H. H., Samman, N., Wang, D., Kot, C.S., Yeung, R.W. (2000). Computer-assisted three-dimensional surgical planning and simulation: 3d virtual osteotomy. *Internal Journal Oral Max Surg*, 29(1), 11-17.
- Xing H., Zou, B., Li, S., Fu, X. (2017). Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3d printed zro2 ceramic components by laser scanning stereolithography. *Ceram Int*, 43(18), 16340-16347.
- Yang, L and Miyanaji, H. (2017). Ceramic additive manufacturing: A review of current status and challenges. *Solid Free Fabr*, 28(1), 652-679.
- Yang, Y., Li, L and Zhao, J. (2019). Mechanical property modeling of photosensitive liquid resin in stereolithography additive manufacturing: Bridging degree of cure with tensile strength and hardness. *Materials & Design*, 162(1), 418-428.
- Yu, N., Nguyen, T and Cho, Y. D. (2019). Kavanagh NM, Ghassib I, Giannobile WV. Personalized scaffolding technologies for alveolar bone regenerative medicine. *Orthod*

Craniofac Res, 22(1), 69-75.

Zhao, Z., Tian, X and Song, X. (2020). Engineering materials with light: Recent progress in digital light processing based 3D printing. *Journal of Materials Chemistry*, 8(40), 13896-13917.

Zocca, A., Colombo, P., Gomes, C.M., Günster, J. (2015). Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(7), 1983-2001.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Serkan SALMAZ

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

Eğitim:

- 2014-2016, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 2002-2007, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Döküm Öğretmenliği Bölümü

Mesleki Deneyim:

- 2010-....., Genel Müdür Yardımcısı, Samulaş A.Ş.
- 2008-2010, Üretim Hat Şefi, Samsun Makina Sanayi A.Ş.
- 2006-2007, Üretim Şefi, Alpaş Döküm San. Ltd. Şti.

Bilimsel Çalışmalar:

- Salmaz, S and Bolat, Ç. (2024). A Versatile Additive Manufacturing Instrument: Photopolymerization-Based 3d Printing And Current Trends For Dentistry and Orthodontics Applications. European Journal Of Materials Science And Engineering, 9(2), 151-172.
- Bolat, Ç and Salmaz, S. (2024). An Investigation On The Wear Properties Of The Photocurable Components Produced By Additive Manufacturing For Dentistry Applications: Combined Influences Of UV Exposure Time, Building Direction, And Sliding Loads. Polymer Engineering and Science, 64(12), 5855-6277.